

Maciej Władysław Grabski

ISTOTA INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ

wykład dla studentów I roku
kierunku studiów Inżynieria Materiałowa
na Politechnice Warszawskiej

© wszystkie prawa autorskie zastrzeżone

Grabkowo, 30 października 2000

Książeczka ta przeznaczona jest dla studentów pierwszego roku studiów, na kierunku Inżynieria Materiałowa i opiera się na notatkach do wykładu ze *Wstępu do Inżynierii Materiałowej*, które Autor prowadzi na Politechnice Warszawskiej od 1977 roku. Głównym jej zadaniem jest nie tyle wprowadzenie w podstawy dyscypliny, ale raczej wzbudzenie do niej zaciekawienia i pokazanie jej istoty. Z tego powodu zasadniczy wpływ na kształt wykładu wywarły pytania i uwagi kolejnych roczników studentów, oraz w równej mierze zarówno okazywane przez nich zainteresowanie jak i jego brak. Szczególne podziękowanie należy się tym spośród nich, którzy słuchali wykładu w 1978 r. oraz uczestnikom długich dyskusji jesienią 1981 w czasie nie zakończonogo seminarium dyplomowego. Dlatego dedykuję tę książeczkę ówczesnym studentom, a dzisiaj doktorom: dwóm Małgorzatom: Lewandowskiej i Skibskiej, Krzysztofowi Karpierzowi, Tadeuszowi Nowickiemu, Jerzemu Kwiecińskiemu oraz Wiesławowi Świątnickiemu. Dziękuję również pani dr Wierze Oliferuk oraz panu profesorowi Henrykowi Samsonowiczowi za przeczytanie rękopisu i cenne uwagi.

SPIS TREŚCI

WPROWADZENIE	4
1. NATURA STUDIÓW WYŻSZYCH	6
2. WIEDZA NAUKOWA I SZTUKA INŻYNIERSKA	10
2.1. Korzenie nowożytnej nauki	10
2.2. Metoda naukowa	13
2.3. Sztuka inżynierska	17
3. MATERIAŁY I CYWILIZACJE	20
4. MATERIAŁY I GOSPODARKA	27
5. MATERIAŁY I TECHNIKA	33
6. STRUKTURA MATERIAŁÓW	39
6.1. Faza	39
6.1.1. Budowa faz stałych	40
6.1.2. Wiązania międzyatomowe	41
6.1.3. Przemiany faz	43
6.2. Mikrostruktura	45
7. KLASYFIKACJA MATERIAŁÓW	48
7.1. Klasyfikacja oparta na sposobie uporządkowania atomów	48
7.2. Klasyfikacja oparta na naturze wiązań międzyatomowych	48
7.2.1 Metale	49
7.2.2 Ceramiki	50
7.2.3 Polimery	51
7.2.4 Kompozyty	52
7.3. Klasyfikacja oparta na użytkowych funkcjach materiałów	53
7.3.1. Tworzywa konstrukcyjne	53
7.3.2. Tworzywa funkcjonalne	54
7.3.3. Tworzywa biomedyczne	54
7.3.4. Tworzywa budowlane i włókniste	54
8. WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁÓW	55
8.1. Właściwości zależne od budowy fazowej	58
8.1.1. Mechaniczna stabilność ciała stałego	58
8.1.2. Statystyczna stabilność ciała stałego	61
8.2. Właściwości zależne od mikrostruktury	63
9. PROJEKTOWANIE MATERIAŁÓW	67
9.1. Zadania inżynierii materiałowej	67
9.2. Metoda inżynierii materiałowej	68
10. GENEZA INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ	73
11. NAUKA O MATERIAŁACH W POLITECHNICE WARSZAWSKIEJ	78
SŁOWNICZEK STU KLUCZOWYCH TERMINÓW	81
LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA.....	88

WPROWADZENIE

W tradycji kultury europejskiej, charakteryzującej się przewagą ducha nad materią, ci, którzy zajmowali się materiałami traktowani byli zwykle z podejrzliwością, a nawet i pewnym niesmakiem. Być może ma to swoje źródło w mitologii greckiej, gdzie pośród doskonałych i pięknych bogów tylko jeden, Hefajstos, bóg ognia i patron kowali oraz metalurgów, był kaleki i brzydki (rys.1). Należy tu jednak wspomnieć, że jego żonami były najpiękniejsze niebianki (Charis bogini wiosny i Afrodyta bogini miłości) i że zbudował ze złota panny-roboty, które następnie ożywił, czyniąc je pierwszymi ziemiankami. Przyjęcie Hefajstosa za patrona ludzi zajmujących się materiałami ma więc swoje pozytywne uzasadnienie: znajdujemy je w tym, że nauka o materiałach spośród wszystkich innych nauk przyrodniczych, jest chyba najbardziej zdolna do łączenia piękna z użytecznością, intuicji z logiką, teorii z praktyką, i mikroświata atomu z makroświatem konstrukcji.

Wraz z powstaniem cywilizacji przemysłowych rola materiałów została jednak stopniowo dostrzeżona i doceniona, a w czasie ostatniego półwiecza okazało się, że to właśnie nowe, zaawansowane materiały stanowią podstawowy czynnik kształtujący rozwój gospodarczy i techniczny społeczeństw.

Wbrew pozorom pojęcie „materiał” nie jest oczywiste. Dzieje się tak dlatego, że materiały otaczają nas ze wszystkich stron i jesteśmy z ich obecnością na tyle głęboko zżyci, iż w potocznym myśleniu uznajemy ich istnienie za rzecz naturalną. Być może dlatego właśnie symptomatyczną osobliwością języka polskiego, uformowanego w wiejsko-szlacheckiej tradycji naszego społeczeństwa jest to, że łaciński termin „materiał” funkcjonuje u nas tylko jako pospolity rzeczownik zmysłowy, dzięki czemu występuje wyłącznie w słownikach, natomiast nie można go znaleźć w encyklopediach!

Mówiąc najogólniej, materiałem nazywamy te wszystkie skondensowane, czyli stałe substancje, których właściwości czynią je użytecznymi dla ludzi gdyż wykonujemy z nich złożone produkty pracy¹. Wartość materiałów ujawnia się więc dzięki temu, iż służą one bezpośrednio do tworzenia rzeczy większych i bardziej złożonych od siebie. Ich rolę znacznie lepiej oddaje rodzimy termin „tworzywo” a więc substancja, z której tworzy się przedmioty. Podana definicja wyklucza spośród materiałów ciała nie stałe (czyli ciecze i gazy) oraz te substancje stałe, których użyteczność związana jest z ich niestabilnością chemiczną, czyli paliwa, środki wybuchowe, żywność, lekarstwa itp. Nie obejmuje również surowców, które stają się materiałami dopiero w wyniku poddania ich złożonym procesom przetwarzania lub syntezy. Odbiega ona tym samym od potocznego słownictwa, w którym zakres pojęcia „materiał” jest znacznie szerszy, obejmując np materiały tekstylne, wybuchowe, piśmienne, kosmetyczne, paliwowe itd.

Dysponujemy obecnie wieloma różnorodnymi materiałami, o ciągle rosnącym stopniu wyspecjalizowania właściwości, mającymi swoje źródło w praktycznie nieograniczonej liczbie możliwych kombinacji ich składu chemicznego, które można utworzyć z istniejącej wielości pierwiastków, oraz w wielości sposobów według których atomy tych pierwiastków mogą zostać ugrupowane w przestrzeni.

¹Przez produkty rozumiemy tu przedmioty lub konstrukcje, niezależnie od tego, czy będą to narzędzia, urządzenia, maszyny, pojazdy, mikroukłady elektroniczne lub też budowle a nawet dzieła sztuki.

Ze względu na szczególną rolę spełnianą w społeczeństwie materiały stanowią przedmiot zainteresowania bardzo wielu gałęzi nauki. Tym obszarem badań, który odnosi się do wzajemnych związków występujących między syntezą, strukturą, właściwościami i zastosowaniami materiałów zajmuje się wielodyscyplinowa dziedzina, która powstała na początku drugiej połowy tego stulecia przez połączenie elementów wielu bardziej szczegółowych dyscyplin i która dla podkreślenia istniejącej w obszarze materiałów symbiozy nauki oraz technologii i techniki nazywa się w języku angielskim **Materials Science and Engineering**. Termin ten, niestety nie daje się elegancko przełożyć na język polski. Dlatego też stosujemy zwykle niezależnie nazwy **Nauka o Materiałach** i **Inżynieria Materiałowa**, pamiętając jednak o tym, że są to dyscypliny wzajemnie nierozdzielne, stanowiące jak gdyby dwie części tego samego obszernego pola wiedzy o stałym stanie materii, rozciągającego się od jej naukowych podstaw do praktycznych, technicznych zastosowań. Dla uproszczenia w niniejszym wykładzie termin **Inżynieria Materiałowa** będzie stosowany w znaczeniu **Nauka o Materiałach i Inżynieria Materiałowa**.

Podejmując studia w naszej dziedzinie musimy więc zrozumieć istotę takich podstawowych pojęć jak **nauka** i **inżynieria**, oraz rozpatrzyć ich wzajemne powiązania. Musimy też uzmysłowić sobie relacje występujące między materiałem i społeczeństwem poprzez ogólną refleksję nad problemami cywilizacyjnymi, ekonomicznymi i wreszcie technicznymi. Dopiero na tym szerokim tle będziemy mogli wejść w nieco bardziej szczegółowe rozważania nad naturą materiałów oraz nad metodą, którą posługuje się Inżynieria Materiałowa. Ich celem będzie próba znalezienia odpowiedzi na pytanie czy warto poświęcić się studiom w zakresie Inżynierii Materiałowej.

Wykład niniejszy nie odgrywa samodzielnej roli w programie studiów: o większości zagadnień w nim poruszanych będzie jeszcze mowa na wyższych semestrach, gdzie zostaną one potraktowane bardziej wyczerpująco i szczegółowo. Ma on raczej charakter przewodnika po nieznanym jeszcze kraju, zaopatrzonego w słownik niezbędnych wyrazów obcych. Wiemy jednak, że wiedzy o innym kraju nie można posiadać wyłącznie na podstawie przewodnika i znajomości kilku podstawowych słów. W tym celu potrzebna jest dobra umiejętność posługiwania się językiem tubylców oraz szczegółowe studia w wielu dziedzinach dotyczących tego kraju, niezbędnych dla poznania jego struktury i zrozumienia odrębności. W trakcie wykładu pokazane zostanie więc w jaki sposób poszczególne przedmioty, składające się na program studiów wiążą się ze sobą, tworząc podstawy dyscypliny, którą w niedalekiej przyszłości absolwenci kierunku studiów Inżynieria Materiałowa będą samodzielnie posługiwać się w praktyce i rozwijać.

1. NATURA STUDIÓW WYŻSZYCH

Education is what survives when what has been learned has been forgotten (The New Scientist, 21 may 1964)

Uniwersytet jest jednym z wyróżniających, fundamentalnych produktów cywilizacji europejskiej. Istotę tej powstałej u schyłku XI a ukształtowanej w XIII wieku instytucji stanowi spójne łączenie nauczania i uprawiania nauki w korporacyjnym związku mistrzów i ich uczniów. Ziarno tej idei, mimo licznych i głębokich przeobrażeń, którym uniwersytety podlegały na przestrzeni wieków, było na tyle uniwersalne, że dotrwało do dnia dzisiejszego. Najważniejsze procesy, które ukształtowały współczesne wyższe uczelnie typu akademickiego a więc te, w których prowadzone są badania i które mają prawo nadawania stopni naukowych, nastąpiły w przeciągu ostatnich dwóch stuleci, między innymi dlatego, że w wyniku rewolucji przemysłowej oprócz tradycyjnych pracodawców dla absolwentów, którymi od wieków były kościół, szkolnictwo, sądownictwo, medycyna i administracja, pojawili się nowi: najpierw przemysł, a następnie biznes. Gwałtowny rozwój i upowszechnienie studiów wyższych w pierwszej połowie XX wieku doprowadziły do licznych kontrowersji, wywołanych zarówno naciskami tych nowych pracodawców, domagających się spełnienia swoich partykularnych potrzeb, jak też i rosnącym wpływem państwa na sprawy uczelni, które w większości są jednostkami państwowymi. Państwo, ponosząc odpowiedzialność za zapewnienie warunków wykształcenia swoim obywatelom, musi przeznaczać coraz to większe kwoty na utrzymanie uczelni i finansowanie badań naukowych, nic więc dziwnego, że powinno mieć kontrolę administracyjną nad wydatkowaniem tych środków, oraz nad kierunkami rozwoju uczelni. Stąd jest jednak bliska droga do ograniczania swobody uniwersytetów w kształtowaniu programów studiów i doboru kadry oraz do ograniczania wolności badań, czyli do umniejszania ich niezależności akademickiej. Krańcowy przykład tego ograniczenia występował w podporządkowanych ideologii państwach totalitarnych. Znalezienie mądrego kompromisu między swobodami akademickimi uniwersytetu a odpowiedzialnością państwa jest bardzo trudne.

Dlatego warto przypomnieć, że konieczność zachowania przez uczelnie szerokiego zakresu autonomii akademickiej wynika stąd, iż powinny być one odpowiedzialne przed społeczeństwem, a nie przed administracją państwową, politykami, czy swoimi sponsorami za kultywowanie, rozwój i udostępnianie wiedzy powstającej w wyniku poszukiwania prawdy i za kształcenie ludzi, którzy tą wiedzę będą potrafili obronić, uzupełniać, wykorzystywać i przekazywać następnym pokoleniom. Jedną z głównych służących tym celom odpowiedzialnością samorządu akademickiego jest dbanie o wysoki poziom naukowy i etyczny własnej społeczności.

Z tych przyczyn uczelnie nie mogą kierować się w działaniach względami doraźnymi, którymi zwykle interesują się politycy, lecz muszą swoją perspektywą wybiegać daleko w przyszłość. Stanowią bowiem jeden z tych niezbędnych, ponadczasowych elementów struktur społecznych, który przez tworzenie odpowiedniego klimatu i systemu wartości związanego z wiedzą naukową, sprzyja rozwojowi jednostek decydujących o przyszłości cywilizacyjnej i kulturowej społeczeństw.

Uniwersytety spełniają więc względem społeczeństwa komplementarną funkcję wobec tej roli Kościoła, która związana jest z przechowywaniem i krzewieniem wartości odnoszących się do zasad moralnych. Nic też dziwnego, że pierwsze uniwersytety wyrosły w ścisłym współdziałaniu z Kościołem, chociaż wkrótce scholastyczny porządek, w którym traktowano religię jako źródło wiedzy o naturze świata, doprowadził do jej konfliktu z poznaniem naukowym, którego symbolem stał się proces Galileusza³. Konflikt ten był brzemienny w negatywne skutki zarówno dla Kościoła, jak i dla nauki. Pogłębił się

³ dopiero w 1992r Kościół przyznał, że w sprawie Galileusza został popełniony błąd

wraz z powstaniem XVIII-wiecznego mitu filozoficznego, nazywanego czasem światopoglądem naukowym, który usiłował przeciwstawić wiedzę racjonalną wiążącą się z nauką, czyli poznaniem doświadczalnym, wiedzy intuicyjnej, wynikającej z wiary. Prowadził on do poglądu, a później i doktryny politycznej, że wiarę można zastąpić nauką, a Kościół wyzwolonym Uniwersytetem, co stanowiło jak gdyby odwrócenie średniowiecznego scholastycznego porządku. Wiemy jednak obecnie, że obydwa te porządki były błędne, gdyż umysł ludzki posługuje się niezależnie i niesprzecznie zarówno wiedzą intuicyjną, jak i racjonalną, oraz mimo że te dwa rodzaje wiedzy wzajemnie się przenikają to jedna z nich nie może zastąpić drugiej. Jest tak dlatego, że dwa odwieczne pytania, przed którymi stoi myślący człowiek, a więc pytanie o to jaki jest świat i pytanie o cel dla którego on powstał, o sens życia, nie znajdują prostej pełnej odpowiedzi w ramach jednego z tych rodzajów świadomości.

Ze społecznej roli uczelni wyższych wynika, iż stoją przed nimi dwa główne zadania, które muszą one harmonijnie spełniać: pierwszym z nich jest edukacja, prowadząca do zrozumienia kontekstu wiedzy i promowania wartości intelektualnych, a drugim szkolenie, dzięki któremu nabywane są umiejętności praktyczne. Celem nowoczesnej wyższej uczelni jest więc tworzenie studentom warunków dla opanowania podstaw wiedzy i umiejętności związanych ze studiowaną dziedziną, wyrabianie techniki komunikowania się, kształtowanie formacji intelektualnej i wreszcie wykształcanie trudnej sztuki dokonywania wyborów.

Aby te cele realizować uczelnie opierają swoje działanie na dwóch podstawowych zasadach, odróżniających je od szkół innego typu. Pierwsza z nich dotyczy relacji występującej między profesorem i studentem, która jest inna od znanych ze szkoły średniej stosunków pomiędzy nauczycielem i uczniem. W przeciwieństwie do sytuacji w szkole, profesorowie wyższej uczelni w rzeczywistości nie uczą studentów (a w każdym razie nie powinni tego robić). Ich rolą jest bowiem występowanie w roli przewodników w samodzielnym opanowywaniu studiowanego problemu, we wnikananiu w naturę rzeczy, pomoc w zgłębianiu dyscypliny, której studia są poświęcone. Ta różnica między szkołą a uczelnią spowodowana jest tym, że studia wyższe mają na celu przede wszystkim rozwinięcie nawyku samodzielnego, kreatywnego myślenia i umiejętności rozwiązywania problemów w danej dziedzinie. Charakteryzując specyficzną i twórczą więź istniejącą pomiędzy profesorami i studentami uczelni wyższych, ktoś powiedział wiele lat temu, że gdy student ma zaufanie do profesora, to czyni słusznie, gdyż zaufanie to pozwala mu szybciej wniknąć w studiowaną dziedzinę, którą profesor już zna, a której student jeszcze nie poznał. Ale osiągnięcie poznania nie polega na zaufaniu profesorowi. Student może posiadać wiedzę lub jej nie posiadać, lecz gdy już ją zdobędzie, staje się to dlatego, że sam uchwycił prawdę tego co wie. Tak więc studia narzucają konieczność aktywnego, a nie biernego stosunku do studiowanej dyscypliny, a ich program opiera się (i musi się opierać) na ryzykownym założeniu, że ten kto studiuje chce wiedzę posiadać.

Druga zasada wiąże się z zachodzącym w trakcie studiów bezpośrednim zetknięciem studentów z nauką. Aby zapewnić skuteczność i autentyczność tego kontaktu wiedzę na uczelni typu akademickiego studenci otrzymują z pierwszej ręki, to znaczy od ludzi, którzy sami zajmują się jej tworzeniem. Mechanizm nowoczesnego uniwersytetu polega na tym, że student pobierając wiedzę uczestniczy równocześnie w procesie jej tworzenia i to właśnie wymaga aby stosunki między profesorami i studentami miały partnerski charakter. Stanowi to też skuteczne zabezpieczenie uniwersytetu przed skostnieniem, gdyż ciągła i otwarta weryfikacja procesu dochodzenia do prawdy przyczynia się do tego, że głównym kryterium weryfikującym zarówno profesurę jak i studentów staje się poziom i rzetelność posiadanej przez nich wiedzy.

W ostatnim półwieczu studia wyższe w naszym kraju zawężano programowo do produkcji wykwalifikowanej siły roboczej, niezbędnej dla zaspokojenia potrzeb scentralizowanej i dogmatycznej władzy, ograniczając ich rolę w promowaniu rozwoju intelektualnego i umiejętności twórczego działania. Prowadziło to do stopniowego

przekształcania się uniwersytetów i politechnik w wąsko specjalizujące szkoły zawodowe, w których kształcenie umysłu chciano zastąpić indoktrynacją nazywaną eufemistycznie „pracą wychowawczą”. Jeszcze w latach osiemdziesiątych głoszono oficjalnie w naszym kraju poglądy, że uczelnie wyższe powinny stać się zakładami dydaktycznymi, pozostawiając badania nie związanym z uczelniami instytucjom naukowym. Ta obca tradycji europejskiej koncepcja miała swoje korzenie w ukazie cara Rosji Piotra I, który chcąc szybko mieć naukę sprowadził uczonych z zagranicy i ustanowił akademię nauk w kraju, w którym nie było ani uniwersytetów, ani tym bardziej studentów⁴. Ów rozdział między nauką i nauczaniem został zachowany w praktyce sowieckiej. Adaptacja rosyjskiego modelu w polskich warunkach stanowiła element tego samego dezintelektualizującego procesu, który przyczynił się do ograniczania kształcenia ogólnokształcącego na rzecz szkolnictwa zawodowego, dzięki czemu mamy w Polsce jeden z najniższych w Europie stopni skolaryzacji, a struktura i stan wykształcenia społeczeństwa odbiega niebezpiecznie od norm właściwych dla krajów cywilizowanych. Procesu tego szczęśliwie nigdy nie udało się w przypadku polskiego szkolnictwa wyższego doprowadzić do końca, chociaż często to, co w rzeczywistości stanowi będące produktem tamtych lat wynaturzenie systemu nauki, jest postrzegane jako jej stan naturalny, a dyskusje o potrzebie zmiany napotykać na niechęć znacznej części środowiska.

Przejdźmy teraz do natury procesu studiowania. Z tego co było do tej pory powiedziane należy wyciągnąć wniosek, iż z faktu podjęcia studiów wyższych wynika konieczność zmiany wyniesionego ze szkoły stosunku studenta do nauki. W szkole średniej nauka przedstawiana bywa zwykle jako zamknięty, uporządkowany gmach, świątynia, przed którą należy zdejmować czapkę. Studiując można szybko spostrzec, że chociaż nauka, dzięki swej metodzie, stanowi uporządkowany i obiektywny gmach, to jednak gmach ten nie jest zamknięty, nie jest skończony i nigdy skończony nie zostanie. Co więcej, również dzięki tej metodzie, pojawiają się czasem istotne wątpliwości, czy wszystkie jego elementy zostały zbudowane prawidłowo. Studia pozwalają dojść do stwierdzenia, że teorie naukowe nie są prawdziwie dosłownymi opisami otaczającego nas świata, a jedynie pewnymi wydedukowanymi systemami, których celem jest porządkowanie i przewidywanie związków występujących pomiędzy obserwowanymi przyczynami a ich skutkami i wyrażanie tych związków w postaci pewnych modeli, hipotez czy teorii, zapisanych za pomocą języka matematyki. Systemy te podlegają ciągłej ewolucji. Wynika to stąd, że chociaż natura jest poznawalna (gdyby było inaczej, nauki uprawiać by nie było można!) to jednak zakres tego co pozostało do poznania rozszerza się w miarę dokonywania kolejnych odkryć. Powstają one na linii odgraniczającej to co jest poznane od nieznanego czy niezrozumiałego, przy czym linia ta, zgodnie z prawami geometrii, wydłuża się w miarę rozszerzania obszaru poznania. Mamy więc do czynienia z paradoksem: im więcej zostało odkryte, tym więcej zostaje do odkrycia! Dlatego też ci spośród studentów, którzy chcieliby poznać gorzyc i radość pracy naukowej, nie muszą obawiać się, iż zabraknie im pól do badania⁵.

Aby studiować należy wyrobić w sobie niezbędną dla każdego stykającego się z nauką umiejętność krytycznego wątpienia. Podstawowa zasada metody naukowej, o której więcej powiemy w następnym wykładzie, polega bowiem na uznawaniu za pewne tylko tego, co wynika z niewątpliwej oczywistości, a więc co jest udowodnione w sposób nie podlegający wątpliwości i może być doświadczalnie sprawdzone w powtarzalnych eksperymentach. Wszystko, co nie jest oczywiste, lub co jest wątpliwe należy uważać jedynie za hipotezę, którą trzeba poddawać metodycznej krytyce. Nie znaczy to jednak,

⁴w 1724 r., natomiast pierwszy uniwersytet rosyjski utworzył Łomonosow w Moskwie w trzydzieści lat później

⁵aby być ścisłym należy jednak zauważyć, że gdyby obszar poznania nie stanowił nieskończonej płaszczyzny ale powierzchni sferycznej, to po przekroczeniu równika linia rozgraniczająca to co poznane od nieznanego zaczęła by się kurczyć i w końcu sprowadziła by się do punktu.

że coś, co dziś nie jest jeszcze nauką, jutro się nią nie stanie, gdy dzięki rozwojowi teorii i technik doświadczalnych podda się rygorom metody naukowej. Historia dostarcza nam nie jednego podobnego przykładu. Ta droga wydaje się mozolna i zniechęcająca, ale trzeba podkreślić, że dzięki niej właśnie nauka stanowi jedną z nielicznych przygód ludzkości, która się powiodła.

Musimy również pamiętać, że, jak wynika z przeprowadzonego wywodu, wiedza poznawana w czasie studiów nie stanowi pełnego odbicia rzeczywistości, gdyż jest adekwatna tylko dla obecnego etapu poznania i obecnego stanu praktyki. Wiele z koncepcji, zasad czy metod, które uznawane są w dniu dzisiejszym, za kilka, czy kilkanaście lat zostanie zastąpionych nowymi, lepszymi, pozwalającymi na stosowanie wyższego stopnia uogólnienia lub bardziej szczegółowego ujęcia, czy wreszcie na lepsze spełnianie wymogów techniki. Ocenia się, że na początku XIX wieku całkowity zasób wiedzy powiększał się dwukrotnie co 50 lat, w połowie obecnego stulecia co 20 lat, a dzisiaj następuje to zaledwie w ciągu dekady, przy czym w niektórych dziedzinach, jak np w mikroelektronice w ciągu zaledwie 3 lat! Tym samym nie na długo przyda się wiedza wyniesiona z uczelni, a na ludziach, którzy zdecydowali się zajmować nauką czy techniką ciąży trudny obowiązek ustawicznego dokształcania się. Nabyta w czasie studiów sprawność intelektualna jest tym właśnie narzędziem, które pozwala nam na ciągłe zdobywanie wiedzy

Ponieważ przedmiot naszych studiów jest tak szybko zmienny, powstaje więc uzasadnione pytanie po co w ogóle studiować i jak studiować, nie mówiąc już o pytaniu o to, jak ten proces studiowania zorganizować. Odpowiedź znajdujemy w stwierdzeniu, że w każdej dyscyplinie naukowej czy technicznej istnieją elementy o różnej dynamice zmienności. Niektóre z nich, ulokowane na owej ciągle poszerzającej się granicy poznania, podlegają niesłychanie szybkim przeobrażeniom. Są też jednak pewne elementy podstawowe, w których zmiany zachodzą znacznie wolniej, istnieją wreszcie zasady naczelną, o bardzo wielkiej trwałości, stanowiące rdzeń całego systemu wiedzy. Jednak i one, w miarę rozwoju nauki, wypełniane są coraz to nową treścią. Doskonałe opanowanie tych podstawowych, wolno zmiennych elementów wiedzy naukowej tworzy fundament, na którym możemy budować nasze rozumienie szybko zmieniającego się świata. Stanowią one tym samym wyposażenie intelektualne, które uczelnia chce pomóc zdobyć studentom, aby przygotować ich do twórczego działania w nadchodzącym półwieczu, do posługiwania się teoriami, koncepcjami i metodami których profesorowie jeszcze nie znają (i pewnie już nie poznają), a które niewątpliwie powstaną w czasie życia zawodowego dzisiejszych studentów. Tak naprawdę nikt nie wie czego należało by obecnie uczyć studentów, aby przygotować ich do twórczej pracy w następnym półwieczu. Świadomość tego faktu leży u podstaw współczesnego modelu uniwersytetu, w którym daleko odchodzi się od wąskiego i szczegółowego specjalizowania na korzyść szerokiej i swobodnie tworzonej bazy podstawowej wiedzy i podstawowych umiejętności.

W trakcie studiów następuje więc poznawanie wiedzy tworzonej i weryfikowanej w ciągu stuleci mozolnej pracy dziesiątków tysięcy naukowców i inżynierów całego świata. Izaak Newton określił ich znaczenie dla tworzenia przyszłości: „*Mogłem spojrzeć daleko, bo stałem na barkach gigantów*”. Nazwiska niektórych z nich będą powtarzane na wykładach i trzeba będzie je pamiętać podczas egzaminów. Inni pozostaną bezimienni, co wcale nie znaczy, że ich praca była mniej warta. Wiedza ta stanowi podsumowanie ogromnego doświadczenia wynikającego zarówno z poznania naukowego, jak i z rozwoju praktycznych umiejętności, będących naszym wspólnym dziedzictwem kulturowym i cywilizacyjnym, które studenci mają przejąć przy pomocy swoich profesorów, by je wzbogacić, a w przyszłości przekazać z kolei swoim następcom.

2. WIEDZA NAUKOWA I SZTUKA INŻYNIERSKA

The scientist describes what is, the engineer creates what never was (Th. von Kármán 1881-1963, Biogr. Mem. F.R.S. 1980, 26, 110)

2.1. Korzenie nowożytnej nauki

Mimo, iż już w zamierzchłej przeszłości ludzie potrafili wiązać przyczyny ze skutkami, co doprowadziło np w Egipcie do wykształcenia się skutecznej sztuki medycznej i stworzenia podstaw wiedzy astronomicznej, to jednak powstanie nauki zawdzięczamy racjonalizmowi Greków, którzy zresztą sformułowali zasady sposobu myślenia charakterystycznego dla europejskiego kręgu kulturowego i cywilizacyjnego. Stało się tak dlatego, że poszukując nieosobowego i trwałego czynnika, kryjącego się poza postrzeganym zmysłami światem, wpadli oni na prosty pomysł dokonywania uogólnień za pomocą pewnych, logicznie uporządkowanych i wzajemnie powiązanych, twierdzeń, które dziś nazywamy teoriami naukowymi. Powzięli myśl, aby przyjąć istnienie stałego, jednolitego, abstrakcyjnego porządku, z którego można by wyprowadzać zmienny, dostrzegalny świat. Dzięki temu nastąpiło zastąpienie mitów przez teorie wyprowadzane z pierwszych zasad i dostosowane do wymagań opartych na logice. Powstała siła motoryczna, zapewniająca cywilizacji europejskiej wyróżniającą ją, spośród innych, wewnętrzną potrzebę ciągłego rozwoju.

Dwa i pół tysiąca lat temu, w początkowym okresie szkoły miletańskiej, nie występował jeszcze tak charakterystyczny dla późniejszego okresu rozdział między nauką, rozumianą w naszym wykładzie jako nauki przyrodnicze, czyli odnoszące się do świata materialnego (*science*), a filozofią i teologią. Przy czym mędrcy usiłowali odkryć wspólną naturę wszystkich rzeczy, którą nazywali *physis*. Tak więc wprowadzone przez miletańczyków słowo *fizyka* oznaczało zabieg na drodze ku poznaniu natury świata i dlatego fizyka stała się królową nauk. Ówczesni mędrcy uważali, że wszystkie dostrzegane formy są uzewnętrznieniem *physis*, traktując rzeczy jako miejsca istnienia bogów (Tales, ok 620-540 p.n.e.) i widząc wszechświat jako swoisty organizm (Anaksymander, ok 610-547 p.n.e.) podlegający ciągłym przemianom wynikającym z gry przeciwności (Heraklit z Efezu, ok 540-480 p.n.e.). Wkrótce jednak w rozwoju myśli europejskiej traktowanie całego świata jako jedności zostało zastąpione innymi koncepcjami, rozłączającymi świat ducha od świata materii. Przyczynił się do tego oponent Heraklita, Parmenides z Elei (ok. 540-470 p.n.e.), który oparł się na koncepcji niezmiennego i poznawalnego bytu. Chcąc pogodzić wyraźne sprzeczności między poglądami Heraklita i Parmenidasa ich następcy przyjęli, że byt przejawia się w pewnych niezmiennych substancjach, których mieszanie i rozdzielanie stanowi przyczynę obserwowanych przez nas zmian świata. Stąd pochodzi zasadnicza dla późniejszego rozwoju nauki koncepcja niezniszczalnej materii jako przedmiotu o zmiennych właściwościach. W oczywisty sposób musiało to doprowadzić Leukipposa i jego ucznia Demokryta z Abdery (460-370 p.n.e.) do zaproponowania koncepcji atomu, jako najmniejszej niepodzielnej części materii⁶. Grecy atomiści przyjmowali, że to co powoduje ruch materii jest zewnętrzne, pochodzi od ducha i jest czymś innym niż materia. Ten rozdział pomiędzy duchem i materią, pomiędzy ciałem i duszą, miał daleko idące następstwa i stanowi podstawę naszego dualistycznego widzenia świata. Należy jednak podkreślić, że nie była to jedyna możliwa droga rozwoju myśli ludzkiej. Starożytny wschód pozostał bowiem przy jedności świata i w zadziwiający sposób rozwinął skuteczne technologie, niekiedy znacznie przewyższające to, czego dokonywano w owym czasie w obszarze kultury zachodniej, nie doprowadzając równocześnie do powstania koncepcji mogących dać tym

⁶ *atoma* w języku greckim znaczy niepodzielny

technologiom naukowe wyjaśnienie. Mówiąc ogólniej, filozofie dalekiego wschodu, w przeciwieństwie do filozofii europejskiej (a ściślej śródziemnomorskiej) nie generowały zainteresowania przyrodniczym wyjaśnianiem zjawisk, dzięki czemu nie stworzyły podstaw dla samodzielnego rozwoju cywilizacji technicznej.

Bezpośrednim skutkiem owego oddzielenia ducha od materii było ograniczenie zainteresowania mędrców do świata duchowego, do prymatu teologii i filozofii nad nauką. Dorobek myśli starożytnej w części odnoszącej się do świata materii, został uporządkowany i zreformowany przez Arystotelesa (384-322 p.n.e.), który stworzył wewnętrznie spójny i łatwy do intuicyjnego zaakceptowania obraz świata. Jednak według Arystotelesa wyjaśnienie przyczyn zjawisk fizycznych lub chemicznych, które uważał on za domenę *techne* czyli wiedzy praktycznej, nie było możliwe w oparciu o przesłanki filozoficzne. Wynikający z tego rozumowania rozdział pomiędzy teorią zjawiska a jego stroną praktyczną stanowił jedną z głównych przyczyn niesłyszanej powolności zmian w następnych stuleciach zarówno w obszarze teorii jak i praktyki .

Wcześni filozofowie chrześcijańscy poczęli traktować przyrodę jako symbol prawd duchowych (św. Augustyn 345-430 n.e.). W konsekwencji, gdy w średniowieczu powtórnie odczytano pisma Arystotelesa, to zawarty w nich obraz świata materialnego, głównie w wyniku myśli św. Tomasza z Akwinu (1225-1274) stał się częścią doktryny chrześcijańskiej. Podważanie nauki Arystotelesa traktowano odtąd jako atak na tę doktrynę, a uczeni scholastycy woleli raczej badać i komentować jego pisma, niż dokonywać doświadczeń, mimo że doktryna chrześcijańska otwierała drogę do doświadczalnego badania świata. Wynikało to ze wskazania, iż stworzenie świata było wynikiem wolnej woli Boga, więc tym samym tego świata nie możemy opisać opierając się na pierwszych zasadach, a jedynie zobaczyć, czyli poznać doświadczalnie. Takie próby były podejmowane, np. przez Rogera Bacona (1214-1294). Na przeszkodzie stał jednak ogromny autorytet Arystotelesa, prowadzący do przekonania, że jeżeli nawet istniały problemy, których on nie rozpatrywał, to tym samym nie warto było się nimi interesować. Dzięki temu system arystotelesowski pozostał praktycznie niezmienny przez blisko dwa tysiąclecia, chociaż nauka Arystotelesa była prawie w całości błędna i łatwa do obalenia za pomocą prostych eksperymentów. Aby tego dokonać potrzeba było jednak geniusza.

Problematyka natury zainteresowano się ponownie dopiero w czasach Oświecenia, gdy w wyniku upowszechnienia oświaty nastąpiło przekroczenie intelektualnej masy krytycznej i zainicjowanie trwającej do dnia dzisiejszego reakcji łańcuchowej w poznaniu przyrody. Rewolucja, która stworzyła podwaliny naszej cywilizacji, oparła się na niezwyklej, elitarnej przygodzie kilkunastu genialnych umysłów, które w ciągu zaledwie trzydziestolecia obejmującego lata 1620-1650, stopiły w jedną oryginalną strukturę dążenia poprzednich pokoleń ku zrozumieniu świata materialnego. Głównym elementem tej rewolucji było wykształcenie dwóch podstawowych dla współczesnej nauki reguł: **oparcia poznania na doświadczeniu** (Galileusz, 1564-1642) oraz **matematyzacji pojmowanej umysłem struktury świata** (Kartezjusz, 1596-1650), które zastąpiły dominującą uprzednio arystotelesowską refleksję filozoficzną. Galileusza uznajemy za ojca nowożytnych nauk przyrodniczych dlatego właśnie, że oparł poznanie naukowe na doświadczeniu, że powiązał dociekania teoretyczne z eksperymentem (rys 2). Kartezjusz, idąc drogą otwartą przez Kopernika (1473-1543) i znajdując się pod wrażeniem wykrytych przez Keplera (1571-1630) matematycznych praw ruchu planet doszedł do wniosku, że możemy za pomocą abstrakcyjnych równań matematycznych, na drodze czystego rozumowania, dojść do opisu całego otaczającego nas świata oraz że prawdziwe jest tylko to co jest oczywiste⁷. Dało to ogromny impuls dla rozwoju matematyki, która w ciągu

⁷Kartezjusz był również odpowiedzialny za wprowadzenie podziału przyrody na żywą i nieożywioną, kanonu który obowiązywał przez następne trzysta lat i został zamazany dopiero w wyniku osiągnięć współczesnej biologii molekularnej.

stulecia wyznaczonego nazwiskami Leibnیتza (1646-1716), Eulera (1707-1783) i Laplace'a (1749-1827) stworzyła solidne narzędzie nowożytnej nauki.

Jedno z głównych założeń fizyki Kartezjusza przyjmowało, że istotą materii jest jej rozciągłość, z czego wynikało, iż przestrzeń jest wypełniona. Założenie to obalił Newton (1642-1727), tworząc podstawy fizyki klasycznej, w której materia jest niezależna od obserwatora, a świat materialny stanowi wielorakość wzajemnie niezależnych, ściśle zdeterminowanych z punktu widzenia czasu, wymiarów i położenia obiektów, zestawionych w potężną machinę wszechświata. W następstwie takiego mechanistycznego obrazu przyrody podstawowe jej prawa, odkrywane i badane przez naukowców były do początku XX w. traktowane deterministycznie, jako niezmiennie i wierne prawa natury rządzące światem i określone nieuchronnymi jednoznaczными związkami przyczynowymi między zjawiskami, które można było przewidywać. Pojawiła się wynikająca z tych poglądów bałwochwalcza niemal cześć dla potęgi nauki, podobna do czci dla potęgi maszyn i niebotycznych konstrukcji stalowych, której to epoki niespodziewanie trwałym symbolem stała się wieża Eiffela (1889 r.). Poglądy te znalazły swoje odzwierciedlenie również w koncepcjach filozoficznych, w literaturze i sztuce, a nawet w praktyce politycznej. Wynikało z nich bowiem przekonanie, że możemy naginać świat i społeczeństwa do swojej idei i woli. Stąd niedaleko było do myśli, że człowiek stanowi nieważny element podporządkowany maszynie społecznej, która w zdeformowanej postaci legła u podstaw totalitaryzmu. Bo jeżeli wszystkie zjawiska natury podlegają prawom fizyki, dzięki czemu możemy je poznać i wykorzystać do kontrolowania świata materialnego, to czemuż nie można by kontrolować stosunków społecznych, a może nawet wychodować nowego człowieka?

Ten obraz runął jednak pod wpływem kolejnej przygody intelektualnej kilku zaledwie ludzi, którzy w pierwszej połowie XX w. stworzyli nową fizykę. W sposób nieraz nieczytelny nie tylko dla laika, nastąpiła rewizja koncepcji wszechświata i relacji człowieka z naturą. U podstaw tej rewolucji legło wybiegające poza ramy mechaniki Newtona stwierdzenie względności czasu i położenia, to znaczy uznanie, że ani czas, ani przestrzeń nie są rzeczywistościami samymi w sobie, a również odkrycie, że masa stanowi formę energii (Einstein, 1879-1955) (rys.3). Eksploracja mikro- i makroświata wykazała niespodziewanie, że pewność należy zastępować prawdopodobieństwem, że związek pomiędzy skutkami i przyczynami nie jest bezpośredni oraz że „porządna” geometria euklidesowa nie wystarcza do opisu przestrzeni. W następstwie nowego sposobu patrzenia na materię stało się oczywiste, że nie można traktować jej jako statycznego agregatu pewnych wzajemnie niezależnych, elementarnych, niepodzielnych elementów maszyny świata, gdyż tworzy ona złożony układ powiązań całości, której część stanowi również obserwator i w której absolutne przewidywanie nie jest możliwe. Max Planck (1858-1947) określił to następującymi słowami: *Tylko wtedy można otrzymać pożyteczny opis praw przyrody, gdy bierze się pod uwagę fizyczną strukturę w jej całości.* Wiedza naukowa w swojej złożoności odbiegła nieskończenie daleko od arystotelowskiego naiwnie-intuicyjnego widzenia świata, co stanowiło jej ogromny sukces ale i klęskę, gdyż dzięki temu sama stała się zbyt trudna do zrozumienia dla nieprzygotowanego człowieka.

Gdybyśmy chcieli poszukiwać jednoczącego, inspirującego i ciągłego wątku całego rozwoju nauki od czasów najdawniejszych do dnia dzisiejszego można zauważyć, że wyznaczyła go chęć zrozumienia obehwładniającego widoku gwiazdzistego nieba. Już w Babilonie poddawano je prawom matematyki, a później inspirowało ono Ptolomeusza, Kopernika, Keplera, Galileusza, Newtona, Einsteina i współczesnych fizyków, którzy odkryli, że nie można pojąć tego co dzieje się wśród gwiazd bez wniknięcia w naturę mikroświata cząstek elementarnych. Doktor Mikołaj Kopernik napisał: *A cóż jest piękniejsze nad niebo, które przecież ogarnia wszystko co piękne?*

W ostatnich dziesięcioleciach drugiego tysiąclecia nastąpił kolejny przełom, który zasypał stworzony przez Kartezjusza podział materii na żywą i nieożywioną i wiązał się z

odkryciami w obszarze biologii molekularnej (Watson i Crick (1953) i genetyki umożliwionymi przez rozwój zaawansowanych technik badawczych. Przesunęło to główne zainteresowanie nauki w kierunku nauk biologicznych. Nasza perspektywa badaczą wzbogaciła się niesłychanie otwierając nieprzewidywalne jeszcze nowe obszary...

2.2. Metoda naukowa

Jak już wspomnieliśmy, wiedzę naukową wyprowadza się z doświadczenia zbieranego na drodze obserwacji oraz z korelowania wyników tych obserwacji ze sobą. Podlega ona działaniu intelektu, którego funkcją jest rozróżnianie, rozdzielanie, porównywanie, mierzenie i klasyfikowanie obserwowanych obiektów oraz interpretowanie zarejestrowanych zjawisk. Dzieje się to na drodze mozolnego procesu dociekania do prawdy, który czasami jest gwałtownie przyśpieszany, lub kierowany na nowe drogi dzięki olśnieniu i genialnej myśli wybrańców. Nauka więc nie istnieje sama z siebie, gdyż jest tworzona przez konkretnych ludzi, którzy w twórczej samotności potrafili postawić nowe pytania i dostrzec związki, przez innych nie przeczuwane lub nie zauważone. Nie można jej jednak uprawiać samotnie, ponieważ proces dochodzenia do prawdy wymaga, aby o interpretacji tych obserwacji rozmawiać z innymi ludźmi.

Podstawową cechą wiedzy naukowej stanowi abstrakcja, bowiem dla porównywania i klasyfikowania niezwykle różnorodności obiektów, struktur i zjawisk nie możemy brać pod uwagę wszystkich ich cech, gdyż byłoby to nie tylko niepraktyczne ale i niemożliwe. Wyróżniamy więc tylko te z nich, które uznajemy za najważniejsze, co pozwala na uproszczenie owej różnorodności. W ten sposób tworzymy intelektualną mapę rzeczywistości, w której rzeczy zostają zredukowane do ich ogólnych cech. Powstały zbiór abstrakcyjnych koncepcji i symboli opisujemy za pomocą liniowej, sekwencyjnej struktury, odwzorowującej strukturę naszego myślenia i mówienia, która w większości języków przejawia się w istnieniu alfabetu. W rzeczywistości jednak świat przyrody jest bardziej złożony: nie ma w nim linii prostych, zdarzenia zwykle nie zachodzą sekwencyjnie, a stosowane terminy i określenia nie są jednoznaczne, z konieczności stanowiąc często jedynie metaforyczne przenośnie⁸, które niejednokrotnie bywają przez profanów brane dosłownie, co potrafi prowadzić do komicznych nieporozumień. Jest oczywiste, że nasz abstrakcyjny sposób myślenia pojęciowego nie nadaje się do precyzyjnego opisywania rzeczywistości w pełnym jej bogactwie. Musimy w tym celu posługiwać się modelami lub -, na wyższym stopniu abstrakcji - matematyką. Bardzo istotny element myślenia naukowego stanowi jednak zrozumienie, że wszystkie modele i teorie naukowe, pomimo metodycznej poprawności swojego wywodu, stanowią tylko pewne przybliżenie, adekwatne do aktualnego stanu wiedzy albo do rozpatrywanego poziomu materii. Jeżeli pozwalają nam one na uogólnianie obserwacji, to możemy je uznać za wystarczające na tyle, aby były użyteczne. Należy w związku z tym pamiętać, że fizyczne modele wprowadzają w błąd, gdy bierze się je za coś więcej niż tylko pomoc dla naszej ułomnej wyobraźni. Warto tu zacytować Einsteina, który negując kartezjański pewnik powiedział: *o ile prawa matematyki odnoszą się do rzeczywistości to są pewne, ale o ile są pewne to nie odnoszą się do rzeczywistości.*

Aby postępować tą drogą nauka musi opierać się na pewnych paradygmatach, czyli założeniach, tkwiących u jej podstaw. Głównym założeniem nauk przyrodniczych jest przyjęcie, że materia w zasadzie zachowuje się tak samo w tych samych warunkach, czyli że różne jednostkowe obiekty i zdarzenia materialne można poddać klasyfikacji w pewne gatunki, które te jednostki reprezentują. Gdyby tak nie było, uogólnianie wyników doświadczalnych nie miałyby sensu, a każda obserwacja musiałaby być traktowana osobno, dzięki czemu zostałibyśmy pozbawieni środków badania świata. Tego

⁸Np mówiąc o sieci krystalicznej wygodnie jest wyobrazić sobie atom jako piłeczkę ping-pongową, mimo iż wiemy, że atom taką piłeczką nie jest.

podstawowego paradygmatu sama nauka jednak zbadać nie może, gdyż nie mieści się to w ramach stosowanej przez nią metody. Można co prawda argumentować, że potwierdzeniem jego poprawności są dotychczasowe sukcesy nauki, ale nie jest to dowód oparty na metodzie naukowej. Prowadzi to do ważnego wniosku: żadna dyscyplina naukowa nie może badać poprawności swoich własnych założeń: w tym celu należy sięgać do dziedzin o charakterze bardziej ogólnym. Dla naszej dyscypliny taką dziedziną jest fizyka, dla fizyki - filozofia nauki.

Tak więc naszą wiedzę wytwarzamy przez dokonywanie obserwacji i ich uogólnianie. Ale odosobniona, chociaż trafna obserwacja, czy pojedyncze prawdziwe twierdzenie nie stanowią jeszcze nauki, tak jak pojedyncze kamienie nie stanowią katedry⁹. W tym celu należy je powiązać z innymi oraz uporządkować we właściwy sposób. Nie stanowi też nauki ogólnikowa mądrość, a więc świadomość, jak się rzeczy mają. Świadomość ta musi bowiem zostać zanalizowana i wyrażona w postaci twierdzeń za pomocą właściwych dla danej dyscypliny pojęć. Wreszcie nie dość jest coś wiedzieć, gdyż trzeba umieć dowieść lub wykazać, że tak jest. Zatem aby posiadane przez nas wiadomości mogły być uznane za naukowe muszą zostać uporządkowane, zanalizowane i udowodnione. Wynika stąd, że wiedza, którą nabywamy, będzie miała charakter naukowy wtedy i tylko wtedy gdy będzie polegała nie tylko na *wiedzeniu* ale i na *rozumieniu*.

Tryb postępowania przy tworzeniu wiedzy naukowej, nazywany badaniami naukowymi, składa się zwykle z trzech etapów:

- 1) definiowania pojęć poprzez wyrażenie ich w postaci mierzalnych wielkości i zbieranie powtarzalnych danych doświadczalnych o zjawiskach, które mają zostać za pomocą tych pojęć opisane;
- 2) wzajemnego korelowania faktów doświadczalnych za pomocą języka słów lub, - na wyższym poziomie abstrakcji, - za pomocą równań matematycznych, tworząc z nich uogólnienia w postaci schematów, które łączą te symbole precyzyjnie i zgodnie z doświadczeniem. Na tej podstawie powstają prawa naukowe, oraz budowane są modele i hipotezy, będące lepiej lub gorzej naukowo uzasadnionymi przypuszczeniami, wyjaśniającymi badane zjawisko. Poddajemy je następnie metodycznej krytyce i doświadczalnemu sprawdzaniu, zgodnie z wymaganiem, że nowa hipoteza musi przewidywać nowe doświadczenia, które są w stanie ją sprawdzić. Jedną hipotezę zastępujemy drugą, nową, tylko w tym przypadku, gdy wszystkie możliwości wykorzystania starej zostały wyczerpane i nie pozwala już ona na opisanie obserwowanych zjawisk¹⁰. Postawioną hipotezę może więc zweryfikować tylko przyroda: w tym celu musimy zadać jej pytanie o prawdziwość hipotezy. Tym pytaniem jest wynikające z hipotezy doświadczenie, a odpowiedź otrzymujemy w postaci jego wyniku.
- 3) konstruowania teorii, czyli uporządkowanego w logiczną i spójną całość zespołu założeń, hipotez, praw i definicji niezbędnych dla objaśniania obserwacji odnoszących się do danej dziedziny zjawisk. Teoria musi być zbudowana w taki sposób aby była ogólna, to znaczy by pozwalała na wyprowadzenie z niej wszystkich bardziej szczegółowych opisów i pozwalała na przewidywanie nowych zjawisk, oraz aby była możliwa do obalenia, to znaczy by istniała logiczna możliwość przeprowadzenia doświadczenia krytycznego, czyli takiego, które mogłoby teorii zaprzeczyć. Postęp w nauce polega więc na tym, aby poprzez redukcję pierwotnych założeń, dochodzić do wyjaśnienia

⁹ Ta metafora pochodzi od Pascala

¹⁰ Zasada ta, którą można sprowadzić do stwierdzenia, że najlepsza jest ta teoria, która jest najprostrza i wymaga najmniejszej ilości założeń nosi nazwę *brzytwy Ockhama*, od nazwiska żyjącego w czternastym wieku angielskiego filozofa.

szerszego zakresu zjawisk, do uporządkowania znanych faktów w bardziej przejrzystym schemacie, do przewidywania faktów nowych, które można sprawdzić doświadczalnie¹¹

W praktyce, te trzy wymienione etapy badań naukowych nie są rozdzielne i nie zawsze idą w tym samym szyku. Możemy np. zbudować hipotezę zjawiska wykorzystując argumenty logiczne, przekonania filozoficzne lub intuicję (geniusz), a następnie modyfikować ją w celu dopasowania do pojawiających się nowych danych doświadczalnych, lub też poszukiwać lepszych, dokładniejszych metod doświadczalnych dla uzyskania jej potwierdzenia. Doświadczenie ma jednak zawsze znaczenie decydujące, gdyż zapewnia ono nauce obiektywność: każdy eksperyment przedstawiony jako dowód danej hipotezy czy teorii może bowiem zostać sprawdzony przez innych ludzi w innych miejscach i w dowolnym czasie. Jeżeli teoria nie znajduje potwierdzenia w eksperymencie, który może zostać dokładnie powtórzony przez innych, to musi zostać odrzucona, mimo tego, że np. prosto wyjaśnia jakieś zjawisko, lub że jest zgodna z jakimś systemem filozoficznym. Dlatego tak wielką wagę przykładamy do eksperymentu - a postęp nauk przyrodniczych jest bezpośrednio uzależniony od rozwoju i doskonalenia techniki i aparatury badawczej, a więc od rozwoju technologicznego. Można więc stwierdzić, że w tworzeniu wiedzy istotną rolę odgrywa zarówno rozum jak i doświadczenie. Rozum czy wyobraźnia pozwalają nam za pomocą logicznych lub matematycznych konstrukcji budować spekulatywne hipotezy, doświadczenie zaś pozwala odrzucić te z nich, które są fałszywe i generować nowe fakty

Ta mozolna droga budowania wszelkich hipotez i teorii przy wykorzystaniu powtarzalnego eksperymentu, a następnie weryfikowania ich za pomocą nowych doświadczeń, które z nich wynikają, nosi nazwę metody indukcyjnej i stanowi istotę nauk przyrodniczych. Stanowi ona sprawdzony, choć niedoskonały sposób postępowania w ciągłym poszukiwaniu obiektywnych odpowiedzi na wciąż nowe pytania stawiane przez naukę i wobec nauki, umożliwiając niezawodne oddzielenie prawdy od mitu, fałszu czy oszustwa. Podkreśla się jednak, że choć ostatecznym sędzią teorii musi być eksperyment, to właśnie teorie w znacznie większym stopniu, niż najlepszy nawet zespół danych indukcyjnych, stanowią źródło inspirujących wyobrażeń pomysłów.

Dobrze jest też zdać sobie sprawę, że hipotezy i teorie naukowe przyjmujemy za stosowalne na podstawie świadectwa innych, na podstawie tego, że zostały one uznane przez ludzi, do których wiarygodności mamy zaufanie. Nie oznacza to wcale, że w nauce powinniśmy opierać się wyłącznie na autorytecie. Wręcz przeciwnie, nie powinniśmy tak czynić. Jednak zmuszają nas do tego względy oszczędnościowe, gdyż nie jesteśmy w stanie sami przeprowadzić doświadczeń sprawdzających wszystkie teorie stanowiące podstawy naszej dziedziny, chociaż najważniejsze z nich powtarzamy w czasie studiów na zajęciach laboratoryjnych¹². Na danym etapie poznania uznajemy więc jakąś teorię za dobrą tylko wtedy, jeżeli sami ją sprawdzimy lub też gdy akceptujemy ją opierając się na doświadczeniach przeprowadzonych przez większość godnych uznania kolegów pracujących w danej dziedzinie. Wynika stąd, że jednym z najistotniejszych elementów pracy naukowej jest przekonywanie pozostałej części społeczności o słuszności własnych hipotez poprzez przedstawianie sprawdzalnych dowodów, które na drodze dyskusji i publikowania poddajemy pod osąd tej społeczności. Wynika też, że uczciwość naukowa musi stanowić podstawowy element systemu nauki. Nie znaczy to jednak, że jakaś teoria może być prawdziwa w sensie absolutnym. Naukowcy bowiem, wbrew powszechnemu mniemaniu, nie zajmują się badaniem prawdziwości teorii, trudnią się jedynie określaniem zakresu ich stosowalności. Oczywiście w skrajnym przypadku zakres ten może być równy zeru, co znaczy, że teoria nie odnosi się do żadnej rzeczywistości i musi zostać odrzucona jako nie mająca sensu.

¹¹ Współcześni fizycy marzą o stworzeniu uniwersalnej teorii wszystkiego, która jednak, paradoksalnie, miała by tą wadę, że była by niemożliwa do zweryfikowania doświadczalnego, a więc tym samym wychodziła by poza obszar nauki.

¹² Zapominamy przy tym, że niejednokrotnie ci, którzy wykonali te eksperymenty po raz pierwszy otrzymali za to nagrody Nobla!

Wiedzę naukową zdefiniowaliśmy więc jako wytwór ludzkiej działalności poznawczej, ujęty w ciągle uzupełniany i weryfikowany system należycie uzasadnionych, wzajemnie zgodnych i sprawdzalnych doświadczalnie twierdzeń i hipotez, zawierających wiedzę o danej dziedzinie rzeczywistości i sposobach jej badania. Celem nauki jest poznanie i zrozumienie natury świata, a przez to wyposażenie ludzi w zasób mądrości i wiedzy, który umożliwia uczynienie go sobie rozumnie poddanym, a naukowcem jest ten i tylko ten, kto docieka prawdy o tym świecie z wykorzystaniem metody naukowej.

Aby obraz nauki był prawdziwy trzeba jednak dodać, że tylko pozornie stanowi ona tak spójnie uporządkowany system. W odkryciu naukowym przypadek i zwykły los szczęścia badacza miały, mają i zawsze mieć będą ogromne znaczenie. Czytając zaś wspaniale logiczny wywód publikacji naukowej nie dowiemy się nic o poprzedzających sukces zarzuconych hipotezach, o błędnych założeniach i wnioskach prowadzących do szukania właściwej drogi w złym kierunku, o beznadziejnych próbach i pomyłkach, o nieudanych doświadczeniach i wreszcie o poniesionych kosztach. Ale dlatego właśnie uprawianie nauki stanowi przygodę, która zawsze fascynowała wielu.

Wielu jednak nie chce pogodzić się z twardymi rygorami tej drogi dochodzenia do prawdy, lub też odstąpią od nich dla poszukiwania chwilowego rozgłosu, dla innych wyjaśnienia dostarczane przez naukę wydają się zbyt proste, lub przeciwnie - zbyt skomplikowane, wreszcie są tacy, którzy będą zawsze widzieli tylko to w co chcą wierzyć. Istnieją też i inni, którzy swoją osobistą nieudaczną intelektualną rekompensują wiarą w różnego rodzaju doktryny spiskowe. Dlatego też obok świata nauki istnieje równoległy świat hochsztaplerstwa i nauki alternatywnej: pseudonauki i wiedzy tajemnej, który rządzi się innymi, nie mającymi nic wspólnego z nauką zasadami, mimo iż często posługuje się, w dowolny zresztą sposób, zaczerpniętą z nauki terminologią. Pseudonaukowcy wykorzystując zapotrzebowanie na sensacyjne, nie wymagające wysiłku umysłowego wyjaśnienia dla prawdziwych lub wymyślonych tajemnic otaczającego nas świata świadomie odrzucają metodę naukową, nazywając ją pogardliwie „nauką oficjalną”¹³. Zaspokajają oni naturalną chęć każdego z nas do poszukiwania azylu przed szarością dnia codziennego w fikcyjnych, bajkowych światach¹⁴. Sprzyja im rozczarowanie zwykłego, pozostawionego przez naukę samemu sobie człowieka, związane z rosnącą trudnością uczestniczenia w racjonalnym rozumieniu świata oraz strachem przed rzeczywistymi i wymyślonymi następstwami rozwoju nauki i techniki, prowadzące ku zjawisku ucieczki od rozumu, oraz głoszenia postmodernistycznego równouprawnienia wtórności.

Trzeba również podkreślić, że termin **nauka** nie jest jednoznaczny, gdyż oprócz omawianej dotąd jej **funkcji poznawczej**, prowadzącej do budowania systemu wiedzy ma ona poza tym zarówno **funkcje praktyczne** jak i **funkcje kulturowe**. Dla działaczy politycznych i gospodarczych nauka jest ważna właśnie przez jej funkcję praktyczną, stanowiącą element wspomagający rozbudowę potencjału gospodarczego czy militarnego państwa¹⁵, względnie przez swoją funkcję kulturową dzięki tworzeniu wartości uniwersalnych jak i tych, które są niezbędne dla podtrzymywania tożsamości narodowej i rozwoju edukacyjnego. Oczywiście nauka wszystkie te funkcje powinna wykonywać, jednak warto tu zacytować słowa Władysława Grabskiego (1874-1938), który będąc zarówno uczyńcą, politykiem, jak i działaczem gospodarczym napisał: *Nauka nie potrzebuje szukać uzasadnienia swej racji bytu w tym, że jest potrzebna działaczom, ale dla tego, że jest niezbędna duchowi ludzkiemu, który poszukuje prawdy.*

¹³ zainteresowanym tematem pseudonauki polecam frapującą książkę prof. A.K.Wróblewskiego *Prawda i mity w fizyce*, Wyd. Iskry, Warszawa 1987, a również Johna Taylora *Nauka i zjawiska nadnaturalne*, PIW, Warszawa 1990.

¹⁴ Stąd taki ogromny wzrost popularności literatury *science fiction* i *fantasy* oraz wirtualnej rzeczywistości gier komputerowych

¹⁵ dla tego wprowadzili pojęcie badań stosowanych a więc służących utilitarnym celom, na które łatwiej przeznaczają środki, odróżniając je od badań podstawowych służących rozwojowi nauki. Podział ten ma charakter umowny.

2.3. Sztuka inżynierska

Słowo **inżynier** ma źródłosłów w łacińskim *ingeniator*, oznaczającym człowieka obdarzonego geniuszem, talentem, dobrą głową i przenikliwością. Sztuka inżynierska jest jedną z najstarszych profesji, znajdując swoje korzenie w sztuce rzemieślniczej wykonywanej w starożytności przez ludzi nie wolnych i zgodnie z Arystotelesową definicją należąc do *tekhne* czyli wiedzy praktycznej¹⁶ (rys. 4).

Do czasów Oświecenia i rewolucji przemysłowej *tekhne* nie stanowiła godnego przedmiotu zainteresowania światłych umysłów¹⁷. W średniowieczu inżynierem nazywano człowieka zajmującego się narzędziami wojny, a więc budowlami i maszynami wojennymi¹⁸, co wiązało się coraz powszechniej ze stosowaniem metod matematycznych, szczególnie podczas projektowania fortyfikacji. Rozwój sztuki inżynierskiej nastąpił w okresie Oświecenia, gdy we Francji¹⁹ a później i w Anglii powstały pierwsze wojskowe szkoły inżynierskie (Kościuszko był takim właśnie inżynierem). Wkrótce inżynierami zaczęto nazywać również i cywilów zajmujących się budowlami lądowymi, a więc drogami, kanałami, tamami i mostami, dzięki czemu do dzisiaj np w języku angielskim inżynieria lądowa nosi nazwę *civil engineering*²⁰. Zakres kształcenia musiał się rozszerzać w miarę rosnących potrzeb indukowanych rewolucją techniczną: pojawili się inżynierowie mechanicy, górnicy, okrętowcy, elektrycy, inżynierowie chemicy i inni. Pochodząca z 1828 roku angielska definicja precyzyjnie określa inżynierską profesję jako sztukę kierowania siłami natury na pożytek człowieka.

Przełamanie arystotelesowskiej bariery (por. str. 11) pozwoliło na stworzenie związku między teorią i praktyką, stanowiącego odąd trwały fundament sztuki inżynierskiej, która w upływie czasu w coraz to większym stopniu oprócz przekazywanego z pokolenia na pokolenie doświadczenia praktycznego uwzględniała uogólnienia dostarczane przez naukę. Znalazło to swoje odzwierciedlenie w tym, że przygotowującym do pracy zawodowej szkołom inżynierskim (technicznym) zaczęto od połowy XIX wieku nadawać pełne prawa akademickie, a więc prawo do nadawania stopni naukowych. We Francji, Austrii, Niemczech i Szwajcarii, a później również w Rosji wyższe uczelnie techniczne, nazywane *politechnikami* pozostały jednak odrębne od uniwersytetów i tę strukturę odziedziczyła po zaborcach również Polska. W krajach anglosaskich postąpiono inaczej - i jak pokazała praktyka - znacznie lepiej, zachowując jedność nauk i włączając z reguły studia techniczne do istniejących uniwersytetów (*comprehensive university*), dzięki czemu stworzono bezpośrednie związki pomiędzy nauką i praktyką, które zaowocowały sto lat później tym, co nazywamy zwykle rewolucją naukowo-techniczną.

Tak więc współczesna inżynieria, podobnie jak i współczesna nauka, powstała dzięki wykorzystaniu dla swych celów abstrakcyjnego języka matematyki. W nauce matematyka jest niezbędna dla uogólniania wyników obserwacji, natomiast w przypadku inżynierii służy ona do obiektywizacji procesu projektowania konstrukcji. Metoda inżynierska również, a może nawet w jeszcze większym stopniu niż metoda naukowa opiera się na doświadczeniu, gdyż z założenia każdy produkt pracy inżyniera musi zostać zweryfikowany swoją użytecznością.

¹⁶ Pierwszym znanym z nazwiska inżynierem był otoczony boską czcią Imhotep, budowniczy piramid w 27 wieku p.n.Ch.

¹⁷ Zdumiewający ślad tego stosunku do techniki znajdujemy jeszcze niespodziewanie w dzisiejszej Polsce, gdzie rodzimi intelektualiści wymyślili pojęcie inteligencji technicznej, jako czegoś pośledniego w stosunku do inteligencji bez przymiotnika.

¹⁸ dopiero w XIX wieku używany dla nazwania techniki wojennej francuski termin *engine* zaczął być stosowany w Anglii również i jako nazwa silnika

¹⁹ Pierwszą szkołą inżynierską była założona w 1747 Ecole Nationale des Pontes et Chaussees - Szkoła Państwowa Mostów i Dróg.

²⁰ termin ten wprowadził Smeaton (1724-1702)

O ile nauka znajduje swoje ograniczenia w prawach przyrody, które usiłuje poznać i opisać, to inżynieria działając oczywiście w ramach tych samych praw odwołuje się również do nagromadzonego doświadczenia praktycznego, a niejednokrotnie i do intuicji. W praktyce inżynierskiej, w przeciwieństwie do metody naukowej, należy dokonywać ciągłych wyborów między możliwościami, które zwykle ani nie mogą zostać dokładnie określone, ani też dokładnie obliczone, gdyż zakres informacji dostarczonych przez naukę jest zwykle niewystarczający lub też zbyt skomplikowany dla stworzenia użytecznych dla praktyki opisów. Dlatego uzasadnionym jest mówienie o profesji inżynierskiej jako o sztuce czy kunszcie, czym nawiązuje ona do jej zaszczytnych, rzemieślniczych tradycji (termin *ars* w języku łacińskim podobnie jak greckie *tekhnē* stosowany jest zarówno wobec sztuki, jak i rzemiosła).

Różnice między wiedzą naukową i sztuką inżynierską wynikają więc nie tylko z ich celów, ale przede wszystkim ze stosowanej metody. Poza tym praktyka inżynierska wymaga uwzględniania wielu dodatkowych elementów, nie związanych bezpośrednio z naukami przyrodniczymi. W zakres odpowiedzialności inżyniera wchodzi bowiem również polityczne, ekonomiczne, społeczne i ekologiczne skutki jego działalności.

Mamy tu do czynienia z ważnym problemem etycznym dotyczącym zarówno nauki jak i techniki i związanym z coraz popularniejszym poglądem, że stanowią one zagrożenia dla człowieka i świata. Otóż trzeba podkreślić, że badania naukowe same z siebie, o ile nie naruszają norm etycznych²¹, nie prowadzą wprost do skutków ani dobrych ani złych, gdyż nie przyczyniają się bezpośrednio do zastosowań działających dla dobra człowieka, lub przeciwko człowiekowi. Zależy to bowiem nie od tych badań, ale od celów dla których zostaną wykorzystane. I tak jak nie możemy twierdzić, iż nie należy jeździć samochodami, gdyż może się zdarzyć, że jakiś oszołomiony, nieostrożny lub głupi kierowca doprowadzi do wypadku, tak samo nie można twierdzić, że nie należy prowadzić badań naukowych, gdyż mogą dostać się w nieodpowiedzialne ręce. Problem sprowadza się więc do tego jak zabezpieczyć się przed nieodpowiedzialnym wykorzystywaniem wiedzy, gdyż nauka i technika stają się dobre, czy złe nie przez siebie same, ale przez dobrowolne, lub niedobrowolne działanie człowieka. W kategoriach etyki czynem dobrowolnym jest takie postępowanie, w którym zasadę pobudzającą stanowi wola działającego oraz jego wiedza o szczegółowych okolicznościach. Można więc świadomie wykorzystywać naukę i technikę w celach przeciwnych człowiekowi i światu a więc złych. Ale można również zrobić to niedobrowolnie albo pod wpływem przymusu (ograniczona wola), albo głupoty (ograniczona wiedza). Stawia to zarówno przed inżynierem, jak i naukowcem obowiązek rozumienia skutków własnej pracy oraz świadomości wynikającej z niej odpowiedzialności. Jest to tym bardziej ważne, że społeczeństwa wyrażają coraz większy brak zaufania do skutków wprowadzania tego, co zwykle nazywano postępowem technicznym, ze względu na nieprzewidywalny wpływ jakie wywiera on na struktury ekologiczne, kulturowe i socjalne.

Inżynierem nazywamy więc współcześnie człowieka, który nabytą w czasie studiów wiedzę z dziedziny matematyki i nauk przyrodniczych oraz osiągnięte doświadczenie praktyczne stosuje z rozważaniem dla zaspokajania potrzeb społeczeństwa, przy czym dobiera on środki i drogi działania tak, aby w sposób ekonomiczny wykorzystywać zasoby i siły przyrody dla dobra ludzi. Reasumując możemy stwierdzić, że inżynieria jest umiejętnością wykorzystywania wiedzy naukowej i doświadczenia w celu tworzenia konstrukcji i sprowadza się do adaptowania materiałów i energii dla zaspokajania potrzeb społecznych. Zadania sztuki inżynierskiej są więc inne niż zadania nauki, pomimo że granice pomiędzy pracą naukową i inżynierską są trudne, a coraz częściej nawet niemożliwe do ustalenia. Wynika stąd konieczność umiejętności wzajemnego

²¹np nie wolno prowadzić badań medycznych, które mogą skutkować utratą zdrowia lub śmiercią pacjenta

porozumiewania się naukowców i inżynierów: w tym celu muszą posługiwać się językiem takich samych pojęć.

W podanych stwierdzeniach jest zawarty pewien często powtarzany mit, wyrażony stwierdzeniem, że rozwój wiedzy naukowej, a mówiąc ściślej rozwój t.zw. badań podstawowych²² jest bezpośrednio niezbędny dla uzyskania postępu w rozwoju cywilizacji, czy wzrostu gospodarczego. W rzeczywistości jednak najważniejsze dla rozwoju cywilizacji odkrycia nie powstały ze zrozumienia natury zjawisk, lecz znacznie je wyprzedzały. Można nawet zaryzykować odwrotne stwierdzenie, że na ogół to właśnie inżynierskie wynalazki i rozwój technologii stanowi inspirację dla nauki i dla poszukiwania ich wyjaśnienia. I tak na przykład silniki parowe znajdowały się już w powszechnym użyciu, gdy dopiero odkryto prawa termodynamiki, rządzące ich pracą, zastosowanie w budowie samolotów wytrzymałych stopów aluminium z miedzią o dwadzieścia lat wyprzedziło zrozumienie ich natury a nawet niedawne odkrycie wysokotemperaturowych nadprzewodników nie stanowiło wyniku dociekań teoretycznych. Jest jednak prawdą, że dzisiaj, w znacznie większym stopniu niż to było kilka dziesięcioleci temu, rozwój technik i technologii znajduje swoje źródło w laboratorium naukowym, z tym, że nie jest to już laboratorium uniwersyteckie, lecz ośrodek badawczy bezpośrednio związany z korporacjami przemysłowymi, które muszą łożyć wielkie środki na badania naukowe, bo inaczej zostaną wyparte z rynku przez konkurencję. Postęp techniczny ma swoje główne źródło nie w badaniach naukowych ale w inspiracji wynikającej z rozpoznania rynku

²² badaniom podstawowym czy poznawczym, czyli czystej nauce, a więc takiej, która prowadzi do zrozumienia ogólnych praw przyrody bez potrzeby zastanawiania się nad ich przydatnością dla człowieka, często przeciwstawia się badania stosowane, a więc służące rozwiązywaniu praktycznych problemów

3. MATERIAŁY I CYWILIZACJE

Clay is moulded to make a vessel, but the utility of the vessel lies in the space where there is nothing.. Thus taking advantage of what is, we recognise the utility of what is not.(Lao Tze (604-533 p.n.e)

Materiałów nie powinniśmy rozpatrywać jedynie poprzez ich przydatność dla realizacji zamierzeń inżynierskich. Stanowią one bowiem dla ludzkości roboczą substancję, umożliwiającą urzeczywistnianie jednego z najważniejszych atrybutów rodzaju ludzkiego, którym jest wykonywanie przedmiotów. Dzięki temu odgrywają istotną i bezpośrednią rolę w przemianach społecznych i cywilizacyjnych. Dzisiaj wiemy, że materiały na równi ze źródłami energii (żywność to też forma energii!) oraz metodami przekazywania informacji stanowią podstawowe cywilizacyjne bogactwo ludzkości. Niestety w potocznej świadomości społeczeństwa polskiego ich znaczenie nie jest doceniane, ponieważ przejawia się ono nie w samych materiałach, ale w wykonywanych z nich rzeczach, a nasi rodacy z zasady fascynują się raczej zewnętrznymi formami postępu niż jego istotą. Mało kto zdaje sobie np. sprawę z faktu, iż przyczyną oszałamiającego rozwoju komputerów osobistych czy syntetyzerów dźwięku było uzyskanie w ciągu ostatniego ćwierćwiecza zupełnie nowych rodzajów materiałów, które pozwoliły na osiąganie nowych, niedostępnych dotąd jakości. Trzeba też podkreślić, że wyjątkowa rola materiałów pośród innych bogactw cywilizacyjnych związana jest z ich bezpośrednim wpływem na dostępność pozostałych bogactw (np opanowanie umiejętności wytwarzania narzędzi rolniczych z żelaza zwiększyło wielokrotnie możliwości uzyskiwania żywności).

Społeczne znaczenie materiałów zostało już dawno dostrzeżone przez antropologów. Wynika to ze stosowanej przez nich definicji gatunku *Homo Sapiens* jako stworzenia, które potrafi wytwarzać narzędzia. Toteż nadali oni poszczególnym epokom nazwy pochodzące od tworzyw przeznaczonych do wytwarzania narzędzi decydujących o stopniu opanowania przyrody przez człowieka. Wyróżniamy więc epokę kamienia, brązu, żelaza, a od połowy XIX wieku mówi się o epoce stali, która stanowiła symbol rewolucji przemysłowej. Jednak na naszych oczach stal przestała rządzić światem, a o poziomie cywilizacyjnym krajów zaczęły decydować możliwości wytwarzania i wykorzystywania nowych materiałów o niezwykłych, wyspecjalizowanych właściwościach. Te tzw. materiały zaawansowane²³ produkowane są w nieznacznym - w porównaniu ze stalą - ilościach, przy zastosowaniu technologii bardzo nasyconych nauką. Wśród nich prym wiodą materiały półprzewodnikowe, dzięki czemu uzasadnionym staje się twierdzenie, że obecnie mamy do czynienia z kolejną epoką cywilizacyjną, z epoką krzemu. Aby jednak pozostać w zgodzie z antropologami wymaga to przyjęcia, że podstawowe narzędzia współczesnej cywilizacji wykonuje się z krzemu, co chyba jest prawdą. Jednak w odróżnieniu od tych materiałów, które stanowiły podstawę poprzednich cywilizacji półprzewodnik pozwala na wytwarzanie narzędzi, których wykorzystywanie opiera się na działaniu intelektu a nie siły mięśni.

Zastanówmy się nad tym co zmieniało się w sposobie wytwarzania i wykorzystywania materiałów wraz z przemijaniem kolejnych epok. Wydaje się, że można z tego punktu widzenia wyodrębnić cztery fazy rozwojowe:

- fazę umiejętności naturalnych,

²³advanced materials

- fazę sztuki rzemieślniczej,
- fazę wynalazków inżynierskich,
- fazę odkryć naukowych.

Każda z nich związana była z pojawieniem się określonych formacji społecznych i niosła ze sobą daleko idące przeobrażenia świata.

Faza umiejętności naturalnych, charakterystyczna dla niezorganizowanych społeczeństw pastersko-myśliwskich z przed epoki brązu, związana była z użytkowaniem na własne potrzeby łatwo dostępnych naturalnych surowców takich jak kamienie, kości, skóra, drewno, glina, które można było stosować jako materiały bez konieczności poddawania zbyt głębokiej przeróbce. Ich uzyskiwanie i przekształcanie w przedmioty użyteczne wymagało prostych umiejętności posiadanych przez każdego człowieka i nie wymagało głębokiej specjalizacji. Odkrycie, które zakończyło tę fazę nastąpiło w chwili, gdy pierwotny mieszkaniec bliskiego wschodu ogrzewając w ogniu miękką, łatwo formowalną glinę przekształcił ją w twardą, trwałą ceramikę krystaliczną, dzięki czemu musiał pewnie doznać boskiego uczucia, iż panuje nad przyrodą (Jerycho, ok 4000 p.n.e.).

Faza sztuki rzemieślniczej, obejmująca epokę brązu i wczesną epokę żelaza, opierała się na odkryciach wynikających z kojarzenia prostych faktów przez niektórych, bardziej spostrzegawczych i rozumnych ludzi i na wynikającej stąd specjalizacji pracy. Wynalezione w ten sposób skuteczne technologie przekazywali oni swoim następcom jako pilnie strzeżoną, często okrytą magią, sztukę cechową. Prawdopodobnie pierwszą instrukcją o ochronie własności intelektualnej jest formułka, którą możemy odczytać na glinianych tabliczkach zapisanych pismem klinowym w dolinie Eufratu: *Niech wtajemniczony pokaże to wtajemniczonemu, niewtajemniczony niechaj tego nie ogląda. Należy to do spraw stanowiących tabu rzeczy wielkich bogów*. Decydującym zdarzeniem dla tej fazy stało się opanowanie umiejętności redukcji rud za pomocą węgla drzewnego w celu otrzymania metali oraz sztuki ich kształtowania przez odlewanie i kucie. W ten sposób powstały materiały, które w zasadzie nie występowały w przyrodzie w stanie naturalnym; zauważono, że stop miedzi z cyną czyli brąz (najstarszy znaleziony przedmiot z tego materiału to lichtarz sumeryjski z 3500 p.n.e.) jest znacznie twardszy od miedzi, dzięki czemu można było wykonywać z niego miecze, a później, że jeszcze lepszą broń można wykuć z żelaza (najstarszy znany wyrób żelazny to sztylet pochodzący ze słynnego grobowca Tutanchamona, 1350 p.n.e.). Pojawiły się też emalie, szkło, papier. Odkrycia te doprowadziły do głębokich zmian społecznych, cywilizacyjnych i kulturowych, gdyż niosły za sobą potrzebę podziału i specjalizacji pracy oraz wprowadzenia wyższych form organizacji. Kto inny bowiem musiał zajmować się wydobywaniem czy zbieraniem niezbędnych surowców, kto inny trudnił się ich przetwarzaniem w materiał oraz transportem, czy wreszcie wytwarzaniem z surowych materiałów przedmiotów użytecznych. Nastąpiło też pewne złagodzenie obyczajów, gdyż jeńcy stali się zbyt cenni jako niewolnicza siła robocza, aby ich bezproduktywnie zabijać. Musiał rozwinąć się handel, powstały więc miasta jako centra organizacyjne, wytwórcze i rynkowe. Zaszła też potrzeba wynalezienia pieniądza oraz systemu bankowego dla usprawnienia wymiany i stworzenia kredytu.

Opanowanie umiejętności wykonywania z metali już nie tylko ozdób czy broni, ale również i tanich narzędzi, umożliwione przez odkrycie metod przetwarzania żelaza, wywarło zasadniczy wpływ na rozwój rolnictwa i stanowiło materialną podstawę dla ekspansji cywilizacji śródziemnomorskiej²⁴. Wymieńmy kolejne etapy: ok 700 p.n.e. zastosowano żelazne siekiery do wycięcia lasów, 500 p.n.e. pojawiły się nożyce do

²⁴ Przykład cywilizacji Majów pokazuje, że bez narzędzi metalowych musi nastąpić zatrzymanie rozwoju, gdyż nie można zapewnić wyżywienia zgromadzonemu w miastach masom ludzi.

strzyżenia owiec, piły ramowe i inne narzędzia do drewna, 200 p.n.e. - upowszechnione zostały kowadła i przeciągadła, co pozwoliło na głębszą przeróbkę żelaza. Pozwoliło to na opanowanie umiejętności wytwarzania podków żelaznych, co bezpośrednio przyczyniło się do znacznego udoskonalenia transportu i ożywiło wymianę handlową. Wkrótce, na początku nowej ery wynaleziono koło wodne, które aż do końca XVIII w stanowiło podstawowe źródło energii. Zastosowanie koła wodnego do napędzania miechów (1295 r.) pozwoliło na istotne udoskonalenie procesów metalurgicznych. Technologia przetwórstwa materiałów była jednak niedokładna i trudno było uzyskiwać powtarzalne jej rezultaty, dlatego też niektóre średnowieczne miecze, które przypadkiem udało się we właściwy sposób obrobić ciepnie stały się przedmiotem legendy, sięgającej dzisiejszych dni. Zainteresowanie materiałami rosło stopniowo w miarę zrozumienia, że można je poddawać kontroli człowieka. Epokę sztuki rzemieślniczej wieńczy wydany w 1556 roku traktat Agricoli pod tytułem *De Re Metallica*²⁵. Mędrcy nie brali w tych zdarzeniach udziału, między innymi i dlatego, że różnica języka pojęć, którymi posługiwali się rzemieślnicy i alchemicy była zbyt wielka²⁶.

Faza sztuki rzemieślniczej trwała bardzo długo, spinając świat antyczny z czasami nowożytnymi. Jej największym osiągnięciem było opanowanie technologii wykonywania narzędzi żelaznych, co z kolei umożliwiło rozwój rolnictwa i uczyniło ziemię cenną, doprowadzając do utworzenia struktur społecznych zabezpieczających jej feudalne władanie. W wyniku tego powstały społeczeństwa rolnicze, których dobrobyt zależał od dostępności ziemi, taniej siły roboczej i istnienia umiarkowanego klimatu.

Kolejna faza, faza wynalazków inżynierskich rozpoczęła się pod koniec XVIII w. i wiązała z przemianami epoki Oświecenia, między innymi z upowszechnieniem umiejętności czytania wśród rzemieślników (usprawnienie metod przekazywania informacji) oraz wzrostem zainteresowania uczonych sprawami przyrody. Nastąpiły znane wydarzenia związane z pierwszą rewolucją techniczną i wykorzystaniem nowego źródła energii którym była maszyna parowa (Savery 1698 r. i Newcomen 1705 r.). Powstawały coraz bardziej złożone konstrukcje mechaniczne wymagające stosowania tanich i powtarzalnych w swoim zachowaniu materiałów. Pierwsi inżynierowie wiedzieli, że każdy materiał ma swoje odrębne właściwości, nauczyli się też obrabiać go w dość powtarzalny sposób. Jednak złożoność natury materiałów nadal wymykała się działaniom intelektu. Zmiana nastąpiła w połowie XIX stulecia, gdy opanowano skuteczne metody analizy chemicznej oraz zrozumiano znaczenie procesu utleniania w przekształcaniu kruchego produktu redukcji rud żelaza w plastyczną i wytrzymałą stal. Szybko doprowadziło to do wynalezienia metod masowego jej wytwarzania (Bessemer 1856 r. , Siemens 1863 r. i bracia Martinowie 1865 r.), wywołując aż dziesięciokrotny spadek ceny i niesłychany wzrost produkcji: w roku 1850 wytworzono na całym świecie zaledwie ok. 60 tys. ton stali a pięćdziesiąt lat później, w roku 1900 już 28 mln ton (obecnie nieco ponad 700 mln ton). Dało to początek cywilizacjom przemysłowym zależnym od dostępności surowców, energii i wykwalifikowanej siły roboczej. Ten okres charakteryzował się wywołanym powszechną dostępnością stali, niezwykle szybkim rozwojem komunikacji, energetyki i budownictwa, oraz kultem industrializacji za wszelką cenę, co przyczyniło się do dramatycznego narastania problemu niesprawiedliwości społecznej.

Istotną przeszkodę w zaspokajaniu rosnących potrzeb XIX-wiecznego przemysłu stanowiła jednak niewielka różnorodność i niski stopień wyspecjalizowania materiałów. Prawdopodobnie pierwszym sygnałem istniejących ograniczeń okazała się niemożność podniesienia wydajności produkcji spowodowana brakiem dostatecznie twardych i

²⁵ W 1612 w Polsce ukazał się poświęcony teorii i praktyce metalurgicznej poemat Walentego Roździeńskiego pt *Officina ferraria albo huta i warsztat z kuźniami szlacheckiego dzieła żelaznego*.

²⁶ale to uczonym alchemikom nadwornym elektora saskiego Augusta Mocnego: Tschirinhausowi (1651-1708) i Böttgerowi (1682-1719) udało się w 1709 odtworzyć pilnie strzeżoną od tysiąca lat chińską tajemnicę technologiczną wytwarzania twardej ceramiki porcelanowej

odpornych na ścieranie narzędzi do obróbki stali na drodze skrawania. Pierwsza stopowa stal narzędziowa (Mushet 1871 r.) była co prawda twarda, jednak grzanie ostrza wywołane tarcie w czasie skrawania powodowało szybkie tępienie narzędzi, co zmuszało do stosowania niewielkiej szybkości obróbki. Wynalezienie stopowych stali szybko tnących (Taylor i White, 1900 r.) udostępniło narzędzia, które mogły skrawać nawet po rozżarzeniu do czerwoności (rys 5). Przyczyniło się to do ogromnego zwiększenia wydajności produkcji, co razem z dokonanym postępem organizacyjnym (Ford 1903 r., Taylor 1903 r.), pozwoliło wkrótce na rozwiązanie problemu produkcji masowej i znaczne obniżenie jej kosztów. Wywołało to konieczność poszerzenia rynków zbytu poza możliwości wynikające z podboju imperialnego. Wzrost wydajności produkcji stanowił jeden z czynników, dzięki któremu sytuacja ekonomiczna i społeczna robotnika w uprzemysłowionych krajach zaczęła z początkiem XX w. ulegać ogromnej poprawie, gdyż z natury rzeczy tylko on mógł stać się masowym konsumentem wytwarzanych przez siebie dóbr technicznych. To z kolei pociągnęło za sobą znaczny rozwój innych, pozaprodukcyjnych obszarów gospodarki. Rezultatem były znowu przemiany cywilizacyjne i ekonomiczne, które całkowicie przeobraziły stosunki międzyludzkie i doprowadziły do demokratyzacji społeczeństw, gdyż nastąpiło zatarcie istniejącego od tysiącleci podziału na tych którzy produkują i tych dla których ta produkcja jest przeznaczona. Taki rozwój sytuacji stał w całkowitej sprzeczności z teoriami rozwijanymi przez XIX-wiecznych propagatorów idei walki klas.

Stanem charakterystycznym dla całego okresu industrializacji związanym z tzw. rewolucją przemysłową było jednak to, że udoskonalanie technologii następowało przede wszystkim dzięki wynalazkom praktyków - inżynierów, a rola badań naukowych, chociaż istotna była jednak stosunkowo mała. Można powiedzieć, że podstawy osiągnięć tej epoki zostały uformowane w warsztatach przemysłowych a nie w laboratoriach naukowych. Postęp opierał się na empirycznym wykorzystywaniu metody prób i błędów oraz intuicji opartej na wątpliwych podstawach naukowych, gdyż brakowało zarówno znajomości natury materiałów jak i metod ich badania. Uzyskane na tej drodze sukcesy, nawet gdy rozpatruje się je z dzisiejszego punktu widzenia, były jednak imponujące. Wspomnieliśmy już o stalach narzędziowych. Wynalezienie stopowych stali konstrukcyjnych (stal manganowa Hadfield 1887 r., stal niklowa Riley 1889 r.) stworzyło podstawy rozwoju przemysłu samochodowego, stali magnetycznych (Hatfield 1903 r.) - elektroenergetyki, chromowej stali odpornej na korozję (Brearley 1913 r., Strauss i Maurer 1910 r.) - przemysłu chemicznego, a wytrzymałych stopów aluminium (Wilm 1906 r.) - lotnictwa²⁷. Opanowanie technologii wytwarzania drutu wolframowego (Coolidge 1909 r.) upowszechniło wynalezioną przez Edisona żarówkę elektryczną. Wynalezienie organicznego materiału jakim był celulooid (Hyatt 1870 r.) dostarczyło doskonałego podłoża dla emulsji fotoczułych (Goodwin 1887 r.), co umożliwiło produkcję taśmy filmowej (Eastmann 1888 r. na zamówienie Edisona) i doprowadziło do powstania kinematografii (bracia Lumiere 1895 r.). Zaczęto stosować polimery do wykonywania izolacji przewodów elektrycznych, pojawił się też bakelit - pierwszy polimer konstrukcyjny (Baekeland 1901, chociaż prawdziwa kariera tworzyw sztucznych rozpoczęła się dopiero po II wojnie światowej). W zakresie ceramiki postęp ograniczał się do opracowywania coraz lepszych materiałów ogniotrwałych niezbędnych dla przemysłu metalurgicznego, chociaż już powstał pierwszy syntetyczny materiał supertwardy, węgiel krzemu (karborund, Acheson 1891 r.), który natychmiast znalazł zastosowanie do wytwarzania narzędzi ściernych. Pojawiły się niezwykle twarde i odporne na temperaturę węgliki spiekane (Schroter 1923 r.), które w postaci płytek ostrzowych w narzędziach skrawających pozwoliły na uzyskiwanie kilkaset razy większych szybkości skrawania, niż było to możliwe przy zastosowaniu stali szybko tnących.

²⁷aluminium stało się dostępne po roku 1886, gdy opanowano elektrometalurgiczne metody jego otrzymywania

Udział naukowców w rozwoju nowych materiałów zaczął rosnać stopniowo od połowy XIX w., gdy w wyniku powstania przemysłu elektrotechnicznego trzeba było zająć się właściwościami magnetycznymi i przewodnictwem elektrycznym. Równocześnie uczeni spostrzegli, że nie tylko skład chemiczny, ale i niedostrzegalne gołym okiem różnice wewnętrznej budowy materiału wywierają wpływ na jego właściwości, co stworzyło szansę na otwarcie drogi do kontrolowanego sterowania technologią. Jednak rozpoczęcie kolejnej fazy rozwoju, a mianowicie fazy odkryć naukowych, nastąpiło dopiero w połowie XX wieku, przede wszystkim dzięki ogromnemu wzrostowi zainteresowania materiałami wywołanemu przez wielkie zadania badawcze związane z tworzeniem niezwykle zaawansowanych systemów technicznych (program atomowy, kosmiczny, lotnictwo, telekomunikacja a później informatyka). Wymagały one równoczesnego rozwiązywania złożonych problemów naukowych i technologicznych przez wielkie zespoły ludzkie. W tym celu w okresie II wojny światowej musiały powstać specjalne organizacje badawcze finansowane bezpośrednio przez rządy, które równocześnie udzieliły silnego poparcia dla prowadzenia badań materiałowych w laboratoriach przemysłowych i uniwersyteckich. Nauka stopniowo przekształcała się w istotny element gospodarki narodowej tworząc podstawy dla powstania wysoce zyskowego przemysłu zaawansowanych technologii.

Podstawę intelektualną fazy odkryć naukowych stanowiło zrozumienie, że metody opracowywania nowych materiałów wymagają znacznie pogłębionej wiedzy o tym, dlaczego materiał pod wpływem przyłożonych bodźców zachowuje się w taki, a nie inny sposób, a więc wykorzystania wiedzy o subtelnych procesach zachodzących w skali mikroświata. Umożliwione to zostało przez sukcesy fizyki pierwszej połowy XX wieku, oraz szybki rozwój technik badawczych. Ugruntowanie fazy odkryć naukowych nastąpiło w chwili zbudowania, w wyniku skoordynowanego wysiłku badawczego, pierwszego tranzystora (Barden, Brattain i Shockley w Bell Telephone Laboratories w roku 1947, nagroda Nobla 1956 r.). Wkrótce po tym, w połowie lat 60-tych zdano sobie sprawę z faktu, że największa wartość dodana, a więc najlepsze wyniki ekonomiczne uzyskuje się wytwarzając produkty zawierające duży wkład myśli technicznej, oraz, że pojawianie się nowych materiałów prowadzi wprost do powstawania nowych produktów, nowych rynków zbytu i nowych miejsc wysoko kwalifikowanej pracy. Rozszerzyło to zainteresowanie materiałami poza dotychczasowy, stosunkowo wąski krąg przemysłu metalurgicznego, gdyż zajęły się nimi bezpośrednio przemysły wytwarzające urządzenia finalne. Zauważono też ograniczoność dostępnych zasobów surowców materiałowych i energetycznych, dostrzeżono zagrożenia ekologiczne związane z konwencjonalnymi przemysłami materiałowymi, z reguły energochłonnymi i brudnymi. W ten sposób materiały, tworzące jedną z podstawowych barier dla techniki, ale równocześnie stanowiące postawę dla dokonania jakościowych zmian w jej obszarze, znalazły się w pierwszej linii działalności naukowej i przemysłowej.

Postęp który nastąpił w zakresie opracowywania nowych materiałów i ich wpływ na przeobrażenia cywilizacyjne jest szybki i niezwykły. Najbardziej spektakularnego, powszechnie znanego przykładu dostarczają wspomniane już półprzewodniki, które umożliwiając powstanie mikroelektroniki i informatyki radykalnie przeobraziły nasze prywatne oraz społeczne życie. Inny przykład stanowią materiały polimerowe, które w latach 60-tych bardzo wolno torowały sobie drogę do zastosowań konstrukcyjnych, aby na początku lat 80-tych w wielu krajach, np we Francji, przekroczyć objętością produkcji łączną objętość wytapianej stali i aluminium. Łatwo widocznym społecznym skutkiem masowego zastosowania polimerów w budowie sprzętu mechanicznego (co wymagało zresztą przewyciężenia wielu nawyków wśród konstruktorów i producentów), było jego potanie i upowszechnienie, czego skutki widzimy w np w naszych gospodarstwach domowych. Wprowadzenie nowego materiału, którym są wytrzymałe i lekkie kompozyty o osnowie polimerowej zbrojone początkowo włóknem szklanym, lub organicznym (Kevlar)

a później również włóknem węglowym i borowym, miało na celu przede wszystkim obniżenie masy samolotów²⁸ i samochodów, a przy sposobności dzięki polepszeniu jakości sprzętu, obniżeniu jego ceny i zwiększeniu skali produkcji, spopularyzowało i zdemokratyzowało wiele gałęzi sportu i rekreacji (narciarstwo, żeglarsstwo, wędkarstwo) a nawet spowodowało powstanie nowych ich rodzajów (windsurfing, lotniarstwo), zmieniając w ten sposób nasze obyczaje. Obserwujemy wyraźny wpływ materiałów również na wyniki sportowe: zastąpienie bambusu metalem, a następnie kompozytami znajduje swoje odzwierciedlenie w kilkumetrowym wzroście rekordu świata w skoku o tyczce. Zwykle bywa tak, że zanim nowy materiał zostaje wprowadzony do budowy bardziej odpowiedzialnych konstrukcji, takich jak np samochody czy samoloty, znajduje zastosowanie w sprzęcie sportowym i rekreacyjnym (jak to było w przypadku np kompozytów) lub urządzeniach powszechnego użytku. Dzieje się tak dlatego, że wytwórca uzyskuje w ten sposób do dyspozycji ogromny poligon doświadczalny, a poza tym drobny, ale masowy odbiorca wiedziony chęcią posiadania lepszego sprzętu czy snobizmem chętnie płaci zań nieco większą cenę, przejmując tym samym znaczną część kosztów poniesionych na badania i rozwój.

Kolejnego przykładu wpływu materiału na cywilizację dostarcza optoelektronika (fotonika). Dzięki opracowaniu włókien ze specjalnych szkieł światłowodowych o przezroczystości o cztery rzędy wielkości większej niż najlepszych szkieł optycznych można było tradycyjny nośnik informacji którym są impulsy elektryczne, zastąpić fotonami emitowanymi przez półprzewodnikowy laser, co zrewolucjonizowało telekomunikację nie tylko dzięki zwiększeniu jakości, gęstości i niezawodności transmisji (pierwszy transatlantycki kabel światłowodowy uruchomiono w 1992 r - pozwala on na równoczesne prowadzenie 40 000 rozmów) ale również przez umożliwienie łączności multimedialnej. Podobnych przykładów jest wiele.

Wprowadzanie nowych, nasyconych wiedzą naukową materiałów do praktyki przemysłowej przyczynia się do powstawania nowych zawodów, nowych gałęzi przemysłu oraz nowych rodzajów usług. Materiały takie wymagają zupełnie nowych, zorientowanych na budowę wewnętrzną, zaawansowanych technologii syntezy i przeróbki. Ich rozwój i upowszechnienie prowadzi też do konieczności zmiany dotychczasowych form organizacyjnych. Dominującą rolę w przeobrażeniach społeczno-gospodarczych krajów o najwyższym poziomie cywilizacji przestały bowiem odgrywać dymiące huty i gigantyczne zakłady mechaniczne oraz dostępność taniej siły roboczej²⁹. Ich miejsce w hierarchii znaczenia dla rozwoju zaczęły zajmować niejednokrotnie stosunkowo niewielkie, wyspecjalizowane przedsiębiorstwa, umożliwiające szybką, bezpośrednią transmisję osiągnięć naukowych do praktyki wytwórczej, w których technologia wytwarzania materiału nie jest rozdzielona od technologii wytwarzania produktu. Przy produkcji w takich przedsiębiorstwach zatrudnieni są nie robotnicy, ale wysoko kwalifikowani specjaliści od kontroli zautomatyzowanych linii technologicznych, a większość pracowników zajmuje się nie bezpośrednią produkcją ale marketingiem, badaniami i rozwojem. Najbardziej wymownym symbolem tego procesu stała się głośna Krzemowa Dolina w Kalifornii. Doprowadziło to do niezwykle głębokich przeobrażeń w strukturach przemysłu. Nie sięgając zbyt daleko: np. w Szwecji w latach osiemdziesiątych zanikły tradycyjne gałęzie gospodarki którymi był hutnictwo (szwedzka stal!) i stocznie. Na ich miejsce pojawiła się wysoce opłacalna produkcja oparta na zaawansowanych technologiach. Proces ten w przodujących cywilizacyjnie krajach idzie jeszcze dalej, gdzie powstał nowy przemysł, który już nie wytwarza materialnych produktów, lecz wartości niematerialne. W tym nowoczesnym przemyśle najważniejsze narzędzia pracy nie stoją w fabrykach ani w rzemieślniczych warsztatach. Najważniejsze

²⁸Pierwszym samolotem bojowym w którym zastosowano na dużą skalę kompozyty zbrojone włóknami boru był oblatany w 1970 roku myśliwiec F-14 Tomcat, dobrze znany miłośnikom komputerowych symulatorów lotu.

²⁹którą zastępuje się w coraz większym stopniu automatami i robotami

narzędzia są teraz w ludzkich mózgach. Ludzie codziennie przynoszą je do pracy i po godzinach zabierają do domu³⁰

Aby takie przeobrażenia mogły nastąpić, niezbędny jest jednak taki system organizacji społeczeństwa, którego punkt centralny stanowi nie władza, ale człowiek. Jak pokazuje historia XXw, industrializację kraju można skutecznie przeprowadzić na drodze centralnego kierowania gospodarką w warunkach omnipotencji państwa, gdzie siłę sprawczą stanowi nieliczna hierarchia sterująca podporządkowanymi jej masami. System taki zabezpieczał pozycję władzy, ale równocześnie stanowił skuteczną zaporę dla promocji indywidualnych, odnoszących się do intelektualnej strefy, sprawności człowieka, mając jak gdyby zakodowany w sobie hamulec dla rozwoju. Nie pozwalał bowiem na skonsumowanie osiągnięć epoki odkryć naukowych. Sprzeczność polega na tym, że w państwach scentralizowanych dla utrzymania władzy niezbędnym stało się posiadanie tego, co przynosi nowa epoka. Jednak aby to mieć, aparat władzy musiałby zrezygnować ze swych atrybutów na rzecz tych, którzy te wartości mogą tworzyć, a więc zmienić swoją rolę ze sprawczej na służebną. Sprzeczność ta okazała się *per definitio* nierozwiązywalna i stanowiła jedną z głównych przyczyn upadku systemu komunistycznego, gdyż nie był on już w stanie skutecznie konkurować z resztą świata w zakresie wykorzystywania zaawansowanych technologii.

Jedną z najbardziej charakterystycznych zmian zachodzących w krajach rozwiniętych jest przekształcanie się systemu organizacji społeczeństwa ze zhierarchizowanej struktury pionowej zależności na sieciową, poziomą strukturę współzależności. Podstawę ich dobrobytu stanowi umiejętność łączenia zasobów wiedzy naukowej z możliwościami rynku. Wiedza naukowa stała się bogactwem najważniejszym, przy czym jest to bogactwo szczególnego rodzaju, gdyż w przeciwieństwie do energii, surowców i siły roboczej, które zapewniały istnienie społeczeństwom industrialnym, jej zasoby rosną gdy dzielimy się nią z innymi.

³⁰ Alain Toffler w wywiadzie przeprowadzonym przez Jacka Żakowskiego, Gazeta Wyborcza 24-27 grudnia 1998

4. MATERIAŁY I GOSPODARKA

Jak już wspomniano, materiały, na równi ze źródłami energii oraz metodami przekazywania informacji stanowią podstawowe bogactwo ludzkości, decydując o poziomie cywilizacyjnym, dobrobycie i bezpieczeństwie społeczeństw. Nic też dziwnego, że w miarę wzrostu zapotrzebowania na surowce materiałowe i energetyczne racjonalne użytkowanie tych bogactw stało się jednym z głównych zadań polityki gospodarczej państw, przy czym znaczenie problemu rośnie proporcjonalnie do stopnia cywilizacji kraju. Przejawia się to złożonymi oddziaływaniami ekonomicznymi stymulującymi zmniejszanie materiałochłonności i energochłonności dochodu narodowego, przy równoczesnym zapewnieniu warunków jego wzrostu i uwzględnieniu bezpieczeństwa państwa (materiały strategiczne).

Materiały stanowią niezwykle ważny element ekonomiki. Obecnie około 10% energii zużywanej w krajach rozwiniętych związane jest z wytwarzaniem i przeróbką materiałów. W przemyśle materiałowym w USA było pod koniec lat osiemdziesiątych zatrudnionych ok 3,0 mln osób w tym tylko 1,5 mln robotników. W tym bilansie materiały zaawansowane stanowią 14% z ogólną wartością ok 70 mld USD (przy zaangażowaniu 10% potencjału ludzkiego). W Japonii ocenia się, że rynek na *sensu stricto* nowe materiały wzrósł w tym kraju z 2,2 mld USD w 1981 do 16 mld USD w 1990 i że wzrośnie do 25 mld USD w 2000 roku. Z tego względu badania nad nowymi materiałami pochłaniają ok 33% nakładów w obszarach przemysłów: kosmicznego i lotniczego, samochodowego, energetycznego, elektronicznego, telekomunikacyjnego i biomateriałów. Podkreśla się, że przemysł zaawansowanych materiałów stanowi podstawowy element zapewniający ekonomiczny wzrost głównych gałęzi gospodarki. Przyczyną tego jest wspomniana już, niezwykła z ekonomicznego punktu widzenia cecha materiałów; powstanie nowego materiału prowadzi do pojawienia się na rynku nowych produktów o wartości wielokrotnie przekraczającej wartość zużytych materiałów. Jako przykład można podać, że w 1985r światowy rynek materiałów elektronicznych o wartości 2,5 mld USD doprowadził do sprzedaży produktów końcowych o wartości wynoszącej 400 mld USD. Inwestowanie w nowe materiały jest jednak zawsze ryzykowne ze względu na niepewność dotyczącą głębokości rynku, który może na nie powstać. Na przykład mimo iż obecnie wielkie środki przeznaczone są na badania w dziedzinie ceramiki, to trudno jest ocenić kiedy pojawi się rzeczywisty rynek na silniki wykonane z ceramicznych elementów (prognozy na 2000 rok wahają się między 5 i 30 mld USD).

Istotne znaczenie w uświadomieniu relacji występujących pomiędzy materiałem i ekonomiką odegrał głośny Raport Klubu Rzymskiego pt *Granice wzrostu* (1972 r.), mimo iż jego katastroficzne prognozy, zapowiadające wyczerpanie się do 2000 roku podstawowych surowców materiałowych, okazały się w całości nieprawdziwe. Nie przewidziano bowiem znacznego wzrostu rozpoznanych zasobów oraz rozwoju technologii (która np pozwala wykorzystywać coraz uboższe rudy). Nie przewidziano również rosnącego stopnia substytucji materiałów oraz rozszerzania ich obiegu wtórnego. Nie przewidziano wreszcie skutków przeorientowania technologii w kierunku oszczędności energii i materiałów³¹. Tak więc problem dostępności do zasobów materiałowych jest obecnie mniej groźny niż kryzys dostępności do energii. Warto tu wspomnieć, że możliwości uzyskania alternatywnych źródeł energii (energia atomowa,

³¹do wymuszenia tych zmian w wielkim stopniu przyczynił się światowy kryzys energetyczny 1974 r

fuzja termojądrowa, energia słoneczna, energia geofizyczna itp) są w znacznej mierze uzależnione właśnie od pojawienia się nowych specjalnych materiałów, w tym przede wszystkim materiałów umożliwiających bezpośrednią konwersję energii.

Materiałochłonność i energochłonność gospodarki są ze sobą ściśle powiązane relacjami technicznymi, technologicznymi, ekonomicznymi i strukturą produkcji, będąc precyzyjnym wskaźnikiem stanu zaawansowania technicznego i organizacyjnego państw. Występujące różnice świadczą jednak nie tylko o odmienności przyjętych dróg rozwoju, czy też o uzyskanym poziomie technologii, ale również i o ogólnym stanie cywilizacji. Na przykład w najbogatszych krajach aluminiowe puszkę po napojach chłodzących i piwie są skrzętnie zbierane i trafiają do powtórnego obiegu, natomiast w Polsce, w której brakuje zarówno aluminium jak i energii wciąż wyrzuca się je do śmietnika³².

Jak wspomnieliśmy, materiały, którymi się posługujemy, znajdują się w systemie obiegu (*recycling*). Wyjawia on wiele bardzo silnych związków występujących pomiędzy materiałem, energią, środowiskiem i społeczeństwem. Surowce pierwotne uzyskiwane na drodze górnictwa czy żniw, podlegają w cyklu produkcyjnym złożonej przeróbce zanim staną się materiałem w postaci półproduktu a wreszcie wykonaną z niego częścią konstrukcji. W końcu, zużyte, po zakończeniu swojej służby w konstrukcjach, materiały te wracają do ziemi jako śmiecie, lub ponownie trafiają do obiegu surowcowego w postaci surowców wtórnych czy złomu.

Istotę zagadnienia można dobrze przedstawić na przykładzie tak ważnego metalu jak aluminium. Produkcja aluminium bezpośrednio z rudy (boksyt) jest bardzo energochłonna (ok 300 GJ/t)³³ i przynosi ogromne spustoszenie środowiska naturalnego, którego ochrona wymaga wielkich nakładów. Sprawa włączenia złomu aluminiowego do ponownego obiegu ma więc zasadnicze znaczenie: obecnie już 22% surowego aluminium w skali światowej wytwarza się z odpadów produkcyjnych, a 10% ze złomu, przy czym to wtórne wytopienie wymaga tylko 5% nakładów energii poniesionych na wytopienie pierwotne z rudy, a więc korzyść energetyczna jest ogromna (w 1985r wyprodukowano na świecie 15,43 mln ton aluminium). Jednak proces odzyskiwania nie jest dostatecznie efektywny, ponieważ ok. dwóch trzecich aluminium zawartego w odpadkach i złomie jest bezpowrotnie traconych trafiając na wysypiska śmieci lub ulegając rozproszeniu w środowisku. Pełne odzyskanie surowca obniżyłoby produkcję aluminium pierwotnego z rudy, a zniszczenie powierzchni naszej planety pracami wydobywczymi i hutnictwem zmniejszyłoby się mniej więcej w podobnym stopniu. Powiększenie ilości aluminium trafiającego do ponownego obiegu wymaga jednak zmiany filozofii konstruowania w kierunku uwzględnienia łatwości złomowania zużytej konstrukcji (jednorodne materiałowo komponenty, unikanie układów, w których elementy są trudne do rozdzielenia) co nie zawsze jest możliwe i uzasadnione. Wymaga też połączenia procesów produkcji z natychmiastową utylizacją powstałych przy niej odpadów.

Obecny nacisk społeczeństw na problemy ekologiczne powoduje niejednokrotnie konieczność daleko idących zmian w zakresie stosowania materiałów. Np trudności z włączaniem polimerów do obiegu wtórnego nabrały obecnie wymiaru ekologicznego, gdyż że względu na swoją trwałość nie ulegają one w warunkach naturalnych rozkładowi, a ponieważ nie ma co z nimi zrobić, więc zalegają na wysypiskach. Mamy tu do czynienia z paradoksem: decydująca o bardzo wielu zastosowaniach zaleta tworzyw sztucznych jaką jest odporność chemiczna stanowi równocześnie ich wielką wadę. Jest to sytuacja odwrotna niż w przypadku stali, która z ogromną łatwością, pod wpływem oddziaływania z atmosferą ulega korozji, powracając do takich samych form tlenkowych z których

³²w 1988 r w USA dzięki odzyskaniu 55% wyprodukowanych puszek aluminiowych i wprowadzeniu ich do powtórnego obiegu uzyskano blisko 0,7 mln ton aluminium, a więc przeszło 10% całkowitej produkcji tego metalu.. w tym kraju

³³dla porównania energochłonność wyprodukowania tony polimeru wynosi 100 GJ a stali 50 GJ

została wyprodukowana, co przynosi straty, sięgające w krajach zaawansowanych czterech procent wytworzonego dochodu narodowego³⁴.

Dążenie do substytucji, do zastępowania dotychczas stosowanych materiałów innymi, wywołana jest zwykle nie brakiem odpowiednich surowców, ale potrzebą obniżenia kosztów ogólnych. Najczęściej związane jest to z dążeniem do oszczędności energii przez wykonywanie coraz lżejszych konstrukcji dzięki wykorzystywaniu materiałów o wyższym stosunku sztywności do gęstości. Można zaobserwować np, że w budowie samochodów i samolotów powoli, ale systematycznie stal jest zastępowana materiałami polimerowymi i kompozytami o osnowie polimerowej, oraz aluminium. Tendencja ta rozpoczęła się przed trzydziestu laty w stosunku do mało istotnych, galanteryjnych, składników wyposażenia, natomiast obecnie dotyczy głównych elementów konstrukcyjnych. W wyniku tego procesu w dziesięciolecie 1976-1986 średnie zużycie stali przypadające na samochód osobowy w USA malało z szybkością ok. 2,4% rocznie, natomiast odpowiednio zużycie aluminium rosło o 5% a tworzyw sztucznych i kompozytów o 2,9%, co spowodowało, że całkowity ciężar samochodów malał w stosunku rocznym o 1,7%. Zmniejszenie masy samochodu o 100 kg powoduje spadek zużycia paliwa o ok. 0,5 litra/100 km, co przy masowości tego środka transportu przynosi w skali kraju niebywałe oszczędności. Prognozy stosowania materiałów w wojskowych konstrukcjach lotniczych, które wejdą do eksploatacji po 2000 roku, a obecnie znajdują się w stadium projektowania, przewidują w stosunku do roku 1987 wzrost wagowego udziału kompozytów z ok 20% do ok 50% i spadek udziału stopów aluminium z 40% do 20% (Rys.6). Kompozyty konstrukcyjne są co prawda droższe od stopów lekkich i stali, lecz dzięki zmianie zarówno technologii jak i konstrukcji pewne wykonane z nich elementy (np stateczniki samolotów) są nie tylko lżejsze ale i tańsze od takich samych elementów metalowych. Toteż zastosowanie kompozytów w lotnictwie, przemyśle kosmicznym, obronnym i samochodowym rośnie ze względu na ich niski ciężar właściwy, wysoką sztywność i wytrzymałość oraz trwałość, poza tym pozwalają one na wytwarzanie skomplikowanych kształtowo elementów w pojedynczych operacjach, a związane z tym nakłady inwestycyjne są niższe niż w przypadku elementów stalowych. Jednak ze względu na niemożność wprowadzania zużytych karoserii kompozytowych do obiegu wtórnego, co prowadzi do gigantycznego marnotrawstwa materiałów i niebotycznych złomowisk, pojawiła się obecnie ekologiczna zaporą dla masowego stosowania kompozytów. Problem w przypadku przemysłu samochodowego nabrał takiego rozmiaru, że obecnie wprowadza się na świecie ustawodawstwo nakładające na producentów samochodów obowiązek przejmowania zużytych samochodów w celu utylizacji złomu. O ile jednak nie powstaną skuteczne metody przerobu złomu kompozytowego, to następną generacją samochodów będzie wykonywana prawdopodobnie nie z kompozytów, ale z nowych, charakteryzujących się wysoką sztywnością stopów aluminium³⁵.

Zasadniczy wpływ na oszczędność energii w budowie silników cieplnych mają materiały przeznaczone do pracy w wysokich temperaturach. Wynika to z bezpośredniego związku pomiędzy sprawnością silnika i temperaturą roboczą w komorze spalania. Turbina gazowa której łopatki pozwalają na utrzymywanie temperatury spalania rzędu 900°C ma sprawność cieplną ok 30%, a wzrost temperatury o każde 50°C przyczynia się do ponad 10% wzrostu owej sprawności cieplnej. Zastosowanie bardziej zaawansowanych materiałów, które, dzięki nakładaniu na nie specjalnych warstw ochronnych, dodatkowo są zabezpieczane przed korozją gazową, dało znaczny wzrost żarowytrzymałości i

³⁴ ocenia się, że 1/3 tych strat można by uniknąć w wyniku pełnego wykorzystania dla ochrony przed korozją posiadanej obecnie wiedzy naukowej.

³⁵Pierwsza linia produkcyjna aluminiowych ram samochodowych została uruchomiona w 1993 fabryce Audi AG w Soest, jej koszt wynosił 70 mln USD.

żaroodporności, co razem z wprowadzeniem systemu powietrznego chłodzenia łopatek³⁶ pozwoliło obecnie na osiągnięcie temperatury spalania bliskiej 1200°C (Rys. 7) zapewniającej ponad 50% sprawność cieplną. Przedsięwzięcie jest opłacalne, gdy istnieje ujemny bilans między wzrostem kosztu amortyzacji droższego silnika i obniżeniem kosztu jego eksploatacji, przy zapewnieniu odpowiedniego czasu pracy. Jednak możliwości tworzyw metalicznych wydają się bliskie wyczerpania. Ogromne nakłady, przeznaczane obecnie na badania nad materiałami ceramicznymi wynikają między innymi stąd, iż oczekuje się, że ich wprowadzenie pozwoli na dalszy wzrost temperatury pracy silnika z obecnych 1300°C do 1600°C, chociaż szansa jest również w kompozytach o osnowie ze związków międzymetalicznych³⁷

Substytucja materiałów niesie też za sobą nieraz poważne konsekwencje ekonomiczne w zupełnie innych obszarach. Stalowe puszkarki dla produktów spożywczych były tradycyjnie zabezpieczane od wewnątrz cyną. Potrzeba oszczędzania tego drogiego materiału o niestabilnej cenie giełdowej doprowadziła w ostatnich latach do zastąpienia stali przez nie wymagające zabezpieczania aluminium, co przyczyniło się w skali światowej do 50% spadku zapotrzebowania na cynę i spowodowało trudności ekonomiczne krajów, w których jej wydobycie było istotnym elementem ekonomii (Malezja, Indonezja, Tajlandia i Boliwia). Podobnego przykładu dostarcza telekomunikacja w związku ze zamianą dotychczasowego nośnika informacji którym jest impuls elektryczny na promień światła. Zastępowanie tradycyjnego drutu miedzianego szklanym światłowodem spowodowało drastyczny spadek popytu na miedź i stanowiło szok dla krajów dysponujących zasobami tego pierwiastka. Obecnie ocenia się, że do roku 2000 całkowite zapotrzebowanie na miedź będzie mogło być pokrywane z utylizacji złomu (m.in. uzyskanego z wycofywania kabli transmisyjnych), a więc dzięki wprowadzaniu zużytego materiału do powtórnego obiegu. Pozycja miedzi w transporcie energii jest również zagrożona rosnącym zastosowaniem aluminium oraz nieodległą możliwością wprowadzenia aktywnych elektrycznie polimerów. Na marginesie warto wspomnieć, że zastosowanie lżejszego i bardziej wytrzymałego materiału na napowietrzne linie energetyczne pozwoliło na stosowanie większych odległości między podporami (słupami), co ogromnie obniża koszty linii przesyłowych.

Zagadnienia materiałowe mają przy tym swoją odrębną specyfikę, wynikająca ze wspomnianej ich roli jako roboczej substancji dla społeczeństw. Ostatnie dziesięciolecie uzmysłowiły z całą ostrością, że najprostszą i najbardziej efektywną metodą oszczędzania energii jest oszczędne i rozropne wykorzystywanie materiałów, oraz, że nowe materiały prowadzą również wprost do powstawania nowych produktów o wysokiej wartości dodanej, stymulują tym samym powstawanie nowych przemysłów, nowych usług i nowych wysokokwalifikowanych miejsc pracy. Uważa się powszechnie, że tworzą one materialną podstawę nadchodzących cywilizacji..

Rozpatrując przyczyny, które doprowadziły do obecnego kryzysu przemysłu polskiego łatwo można stwierdzić, że w znacznym stopniu jest on wywołany jego niezwykle wysoką materiałochłonnością i energochłonnością. Potwierdza to porównanie syntetycznych wskaźników charakteryzujących poziom materiałochłonności gospodarki, którym jest ilość materiałów potrzebnych do wytworzenia jednostki dochodu narodowego. Z danych odnoszących się do 1981r wynika, że w Polsce zużywało się wtedy w tym celu cztery krotnie więcej stali niż we Francji, trzykrotnie więcej niż w USA i RFN oraz blisko dwukrotnie więcej niż w byłej NRD i na Węgrzech. Równocześnie jednak w zużyciu podstawowych materiałów na jednego mieszkańca zajmowaliśmy

³⁶system powietrznego chłodzenia łopatek wprowadzony w siedemdziesiątych latach pozwolił podnieść temperaturę spalania do 1300°C, a więc o ok. 400°C powyżej możliwości łopatek niechłodzonych. Dalsze podwyższenie temperatury spalania wydaje się możliwe jedynie na drodze zmiany materiału.

³⁷na bazie związków aluminium: TiAl, Ti₃Al lub Ni₃Al albo związków krzemu z metalami trudnotopliwymi: MoSi₂ czy WSi₂.

porównywalną pozycje, za wyjątkiem aluminium i tworzyw sztucznych, których konsumowano nieproporcjonalnie mało.

Dziewiętnastowieczna koncepcja forsowania rozwoju kraju na drodze inwestowania w przemysł ciężki spowodowała, że prawie pięciokrotny wzrost produkcji przemysłowej w Polsce, który nastąpił w latach 1960-1980 nastąpił przy równoczesnym wielkim wzroście materiałochłonności, podczas gdy w innych krajach, przez wprowadzanie nowych konstrukcji i technologii, oraz dzięki przekształcaniu struktury produkcji w kierunku zwiększania wartości dodanej, przyrost dochodu narodowego następował przy zmniejszającym zużyciu materiałów i energii. W wyniku tego koszty materiałowe stanowiły w przemyśle polskim rosnącą i dominującą pozycję kosztów wytwarzania. Nieefektywne hutnictwo i górnictwo zużywało znaczną część własnej produkcji, co z kolei powodowało brak materiałów dla celów przemysłu przetwórczego. Nowoczesna technika wymaga dostępności bardzo szerokiego asortymentu wyspecjalizowanych jakościowych stali stopowych o wysokim stopniu przetworzenia. Jednak błędne koncepcje rozwoju hutnictwa spowodowały, że jest ono obecnie zdekapitalizowane, oparte na przestarzałych technologiach i niewydajne, nic więc dziwnego że charakteryzuje się wyjątkowo niskim procentowo udziałem tych produktów w ogólnej produkcji stali, jest on trzykrotnie niższy niż np we Francji czy Japonii. Tworzy to wyjątkowo niekorzystną strukturę wymiany zagranicznej; za drogie asortymenty musimy płacić tanim nieprzetworzonym produktem. Z drugiej strony przemysł stosował stal w sposób znacznie odbiegający od wskaźników światowych, przez nadmierne wykorzystywanie jej tam, gdzie zarówno względy konstrukcyjne, techniczne czy ekonomiczne wskazują na konieczność stosowania innych materiałów, szczególnie tworzyw sztucznych i aluminium. Jeżeli w Polsce w 1980 r. na 1 tonę zużytej stali przypadało zaledwie 60 kg innych tworzyw konstrukcyjnych, to w RFN, Francji i USA wskaźnik ten przekraczał 200 kg a w NRD - 160 kg. Przyczyną była ograniczona dostępność tych tworzyw na rynku wywołana brakiem własnej produkcji i niewymienialnością złotówki, ale również i brakiem tradycji ich stosowania w konstrukcjach. Równocześnie struktura produkcji charakteryzowała się niskim stopniem przeróbki materiałów, co pogłębiało ekonomiczną nieefektywność ich wykorzystywania. Innym czynnikiem odpowiedzialnym za istniejącą sytuację, był obserwowany od 1975 r. wzrost ilości odpadów i złomu powstającego w procesie produkcji. Wynikało to z przekraczania uzasadnionych granic zużycia materiałów na skutek pogłębiającego się niedopasowania struktury produkcji przemysłów materiałowych do struktury popytu, wprowadzania zbyt ciężkich konstrukcji, niewłaściwego doboru materiałów, nieefektywnych technologii, nie dotrzymywania reżimów technologicznych, czy wreszcie nadmiernej ilości braków, niskiej trwałości produktów oraz rabunkowej eksploatacji zarówno urządzeń technologicznych jak i gotowych produktów. Istotną rolę odgrywała w tym nadrzędność administracyjnego myślenia w kategoriach planu nad myśleniem inżyniersko-ekonomicznym, prowizoryczność działań ale również i ogólnie niski stan kultury technicznej w naszym kraju.

W obszarze przemysłu przetwórczego nadmierna materiałochłonność ma dwie przyczyny: jedna związana jest z niewłaściwym projektowaniem, co w znacznej mierze wynika z niepoprawnego doboru materiałów (często spowodowanego niedostępnością odpowiednich asortymentów), druga jest skutkiem stosowania niewłaściwych technologii, w wyniku czego ogromne ilości materiałów są tracone w postaci odpadów i wiórów. W roku 1978 stracono w ten sposób blisko półtora miliona ton materiałów konstrukcyjnych, z czego około 1 miliona ton stanowiły wióry powstające w trakcie nadmierne stosowanej obróbki skrawaniem. Udział w parku maszynowym obrabiarek do przeróbki plastycznej, która jest materiałooszczędną, minimalizującą ilość odpadów technologią, wynosił w Polsce na początku lat osiemdziesiątych w zaledwie 7,4%, podczas gdy w CSSR - 20%, we Francji 25% a w RFN i USA przekraczał 30%.

Przeprowadzona analiza wskazuje na różnorodność przyczyn rozrzutnego zużywania materiałów w polskim przemyśle, co było sytuacją typową dla wszystkich

scentralizowanych gospodarek nie rynkowych z ich tendencją do utrzymywania produkcji za wszelką cenę, bez liczenia się z całościowymi, ekonomicznymi jej skutkami. Nic więc dziwnego, że wprowadzenie w 1990 r. wymienialności złotego i wstrzymanie dotacji oraz stopniowe dochodzenie do gospodarki rynkowej ujawniło, że krajowe materiały i wyroby przemysłowe są z zasady droższe od zagranicznych, w czym ma również swój istotny udział bardzo niska wydajność pracy, wadliwa jej organizacja i związane z tym przerosty zatrudnienia. Musiało to doprowadzić do upadku całych gałęzi przemysłu.

Bariera świadomości w zrozumieniu znaczenia nowych materiałów i ich technologii dla ogólnie pojętego rozwoju stanowi główną trudność i podstawowy problem do rozwiązania. Problem ten ma szczególnie doniosłe znaczenie w naszym kraju, nie tylko ze względu na znaczne opóźnienie cywilizacyjne, którego kolejne pokolenia nie miały szansy nadrobić, ale też i z powodu prowadzenia przez lata polityki przemysłowej opierającej się na przeżytych koncepcjach. Wepchnęły one naszą gospodarkę na drogę nieelastycznego, materiałochłonnego i energochłonnego profilu produkcji, natomiast dominacja administracyjnych metod zarządzania przyczyniła się do stopniowej deprecjacji zawodu inżynierskiego i uczucia powszechnej niemożności. Struktury gospodarcze przygniotły bowiem człowieka. Zmienić ten stan rzeczy można, ale do tego potrzebne są nie tylko nowe struktury gospodarcze czy polityczne, ale przede wszystkim inni w swoim sposobie myślenia ludzie.

5. MATERIAŁY I TECHNIKA

Podjmując wątek odnoszący się do relacji występujących pomiędzy materiałem i techniką należy zastanowić się przez chwilę nad istotą pracy inżynierów, którzy owe związki realizują.

Jak już wspomnieliśmy, głównym celem pracy inżyniera jest tworzenie urządzeń i systemów technicznych, a więc adaptowanie materiałów i energii dla ekonomicznego zaspokajania potrzeb społecznych. Powstanie nowej konstrukcji można niejednokrotnie przewidzieć na podstawie posiadanego doświadczenia, a obecnie coraz częściej wykorzystując nagromadzoną wiedzę naukową. Również, co wiemy, może ją wyśnić fantazja lub intuicja twórcy. Zwykle jednak bywa tak, że potrzeba nowej konstrukcji inicjowana jest warunkami rynku określonymi naciskiem społecznym, ekonomicznym lub politycznym. Oczywiście sama idea czy potrzeba nie stanowią jeszcze wystarczającego warunku realizacji. Urzeczywistnienie tej potrzeby jest bowiem bezpośrednio uzależnione od dostępności trzech podstawowych i sprzężonych ze sobą czynników: informacji (czyli zasobów mądrości i umiejętności), materiałów oraz źródeł energii. Poza tym istnieją ograniczenia wywołane uwarunkowaniami cywilizacyjnymi, ekonomicznymi, etycznymi i ekologicznymi.

Złożone współzależności występujące między wymienionymi czynnikami podstawowymi można skutecznie prześledzić na przykładzie pochodzącym z historii lotnictwa. Wiemy, że już w XVw. mistrz Leonardo da Vinci przeczuwał zasadę lotu maszyny cięższej od powietrza, ale nie posiadał ani właściwych materiałów do jej wykonania, ani źródła energii dla uniesienia w powietrze. Rzecz w tym, że, jak wiemy obecnie, do tego aby maszyna wzleciała potrzebne jest osiągnięcie pewnego stosunku dysponowanej mocy napędu do całkowitego ciężaru maszyny i jej oporu lotu. Cztery lata później zasób nagromadzonych umiejętności i wiedzy był na tyle duży, że w wielu krajach podjęto próby lotu na płatownicach budowanych ze sklejki (wynalezionej w 1900 r.), bambusu, rurek stalowych, drutu i płótna. Jednak dopiero braciom Wright udało się wzlecieć w powietrze (1903 r.), a główną przyczyną ich sukcesu było to, że zaopatrzyli swój samolot w lekki silnik spalinowy, z blokiem wykonanym z aluminium, które właśnie stało się handlowo dostępne, dzięki czemu uzyskali stosunek mocy do ciężaru umożliwiający lot. Początkowo samoloty stanowiły przedmiot zainteresowania hobbystów i sportowców, aż do chwili, gdy najpierw zastosowania wojskowe, a później powstanie lotnictwa komunikacyjnego nie wytworzyły dla nich ogromnego rynku. Od tej chwili wyraźnie widać, jak dalszy rozwój konstrukcji latających uzależniony jest od jakościowych zmian zarówno w obszarze metod projektowania jak też napędów i materiałów, przy czym zależności te są złożone i wielokierunkowe. I tak zastąpienie sklejki, drewna i płótna przez stale stopowe i stopy lekkie zmieniło kształt i możliwości samolotu, jednak dużo czasu musiało upłynąć, zanim konstruktorzy wyzwolili się z nawyków, które narzucała konstrukcja drewniana: pierwsze samoloty aluminiowe wyglądały tak samo jak drewniane (aluminiową blachę falistą do pokrycia skrzydeł i kadłuba zastosował jako pierwszy Junkers w 1915). Mieliśmy więc sytuację, w której materiał był dostępny, natomiast brakowało umiejętności jego wykorzystania. Odwrotna sytuacja powstała w chwili zbudowania pierwszego silnika turboodrzutowego (Whittle 1937 r.). Silniki te przez dekadę raczkowały na hamowniach, czekając na nowe materiały, które mogłyby sprostać temperaturom panującym w komorach spalania i siłom działającym na łopatki turbiny przez czas dłuższy niż kilka lotów. Dopiero opracowanie tzw. superstopów, czyli żarowytrzymałych stopów na bazie niklu, zapewniło silnikom turboodrzutowym

odpowiednią trwałość i ekonomiczność, co pozwoliło na ich wprowadzenie do lotnictwa komunikacyjnego (DeHavilland Comet 1956 r.). Wreszcie dzięki zastosowaniu nowych ultra lekkich materiałów udało się urzeczywistnić odwieczne marzenie człowieka: lot Ikara siłą własnych mięśni. W ten sposób powróciliśmy do idei mistrza Leonarda. To, że człowiek wcześniej pokonał barierę dźwięku (1947 r.) i osiągnął księżyc (1969 r.) niż mięśniolotem przeleciał nad Kanałem La Manche (McCready 1979 r.) nie jest paradoksem, ale przekonującym dowodem na to, że rozwój materiałów zapewniających dostępność ekstremalnych właściwości, następuje zwykle mozolniej niż pozostałych czynników. Presja lotnictwa na materiały jest ogromna: stosunkowo niewielkie zadanie techniczne którym było zbudowanie oblatanego w 1989 r. „niewidzialnego” bombowca B-2 *Stealth* wymagało opracowania aż 400 nowych ich gatunków!

Jak już wspomniano, zdarza się, że warunki rynku i wynikająca z nich konieczność poszukiwania nowych rozwiązań technicznych stwarza zapotrzebowanie na materiał o szczególnych, jeszcze nie istniejących właściwościach. Jeden z ostatnich przykładów takiej sytuacji dostarcza nam telekomunikacja. Zadaniem układów telekomunikacyjnych jest przekazywanie na odległość sygnałów w postaci modulowanych (tj. sterowanych) impulsów. W pierwszej połowie XIX wieku odkryto, że można tego dokonywać za pomocą przerywanego mechanicznym kluczem obwodu elektrycznego (telegraf, Morse 1837 r.). Pozwoliło to na zwiększenie odległości transmisji poza ograniczenie wynikające z dotychczas stosowanej metody sygnalizacji optycznej jednak modulacja sygnału była limitowana szybkością przełączania klucza co pozwalało jedynie na transmisję sygnałów w postaci kropek i kresek alfabetu Morse’a³⁸. Wynalezienie szybkich magnetycznych przetworników akustyczno-elektrycznych którymi były mikrofon i słuchawka (Bell 1876 r. , Edison 1877 r.) otworzyło możliwość przekazywania na odległość głosu (telefon), jednak ze względu na małą amplitudę tak modulowanego sygnału odległość transmisji była ograniczona (pierwszą rozmowę międzynarodową przeprowadzono w 1882 r. między Paryżem i Brukselą, w 1892 roku najdłuższa na świecie linia telefoniczna łączyła Nowy Jork i Chicago, odległe od siebie o niespełna 1500 km). Skutecznym półśrodkiem na drodze do zwiększenia odległości było zmniejszanie tłumienia sygnałów na drodze indukcyjnej (Puppin 1899 r.), jednak rozwiązanie problemu nastąpiło dopiero w roku 1909 dzięki wynalezieniu triody przez De Forest’a. Otworzyło to możliwość modulowania sygnału elektrycznego już nie na drodze mechanicznej ale elektronicznie. Był to wielki postęp. Lampa elektronowa była znacznie szybsza niż przełącznik mechaniczny a co więcej, pozwalała na wzmacnianie sygnału. Miała jednak poważne wady; wymagała znacznej energii dla rozżarzenia katody, emitowała ciepło, była droga, duża i zawodna. Zaczęto więc poszukiwać innych rozwiązań, dostarczył do nowy materiał - półprzewodnik, dzięki czemu w 1947 r. powstał tranzystor (o tym epokowym wynalazku była już mowa). Potrzebował on energii milion razy mniejszej niż lampa, był tani, mały, niezawodny i znacznie szybszy. Ale rosnące potrzeby telekomunikacji przewodowej wymagały dalszego zwiększenia szybkości transmisji, postanowiono więc wykorzystać jako nośnik impulsu nie elektrony ale fotony. W tym celu zastosowano impulsy światła generowane w materiale lasera półprzewodnikowego lub diody świecącej. Aby umożliwić transmisję światła potrzebny był jednak przewodnik, który spełniałby dla fotonów podobną rolę jak drut miedziany dla elektronów. Znakomita przezroczystość superczystego szkła pozwoliła na opracowanie światłowodów, czyli cieniutkich włókien ze specjalnie spreparowaną powierzchnią o niższej refrakcyjności niż rdzeń, co z kolei pozwala na utrzymywanie wiązki światła we włóknie i uniknięcie rozpraszania związanego zawsze istniejącymi wadami powierzchniowymi. (Rys. 8). Przez takie włókno sygnał świetlny może biec setki kilometrów zanim znajdzie potrzeba jego wzmocnienia. Co więcej, przez domieszkowanie szkła Erbem można wytworzyć światłowód aktywny, w

³⁸stałe kablowe połączenie transatlantyczne uruchomiono po wielu niepowodzeniach w 1866 r

którym światło ulega samoistnemu wzmocnieniu, co usuwa potrzebę wzmocnienia sygnału. Pojawia się jednak trudność, podobna do tej która istniała w telegrafii przed wynalezieniem triody, a więc w czasach gdy impuls elektryczny musiał być sterowany mechanicznie. Obecnie, dla wzmocnienia lub modulowania impulsu światła należy go najpierw przekształcić w impuls elektryczny za pomocą półprzewodnikowego fotodetektora, następnie wzmocnić elektronicznie i ponownie przekształcić w światło, aby mógł biec dalej. To działa, ale mogłoby być lepsze, gdybyśmy potrafili skutecznie sterować fotonami za pomocą fotonów, tak jak już umiemy sterować elektrony elektronami. Nie dysponujemy jednak aktywnym elementem obwodu fotonicznego, który pozwalałby na wzmocnianie i przełączanie światła za pomocą impulsu świetlnego, a więc który by spełniał w obwodzie świetlnym taką samą rolę, jaką w obwodzie elektrycznym spełnia tranzystor. Być może dlatego tę dziedzinę techniki nazywamy jeszcze optoelektroniką a nie fotoniką. Dla naukowców i inżynierów zajmujących się tym zagadnieniem zadanie jest więc jasne i ściśle określone, podobnie jak to było w przypadku ludzi pracujących nad wynalezieniem tranzystora; dokładnie wiedzą jakie funkcje ma spełniać tranzystor fotoniczny, który chcą zbudować. Szansa tkwi w niezwyklej materiałach o nieliniowej charakterystyce optycznej, w których niewielka zmiana intensywności padającej wiązki światła powoduje skokową zmianę mocy wiązki przechodzącej. Pierwszy taki materiał już powstał, jest to kryształ LiNbO_3 , ale do zbudowania na jego podstawie efektywnego urządzenia czeka nas jeszcze mozolna droga.

Niezależnie od postępu w metodach przekazywania sygnału podstawowym elementem urządzeń telekomunikacyjnych i fonicznych są nadal przetworniki akustyczno-elektryczne zamieniające dźwięk na sygnał elektryczny (mikrofon) i sygnał elektryczny na dźwięk (słuchawka, głośnik). Podstawowym materiałem decydującym o jakości i gabarytach tych przetworników są materiały magnetyczne twarde, a więc odznaczające się dużą koercją oraz szeroką pętlą histerezy magnetycznej. Osiągnięte od czasów Bella blisko stu-krotne zwiększenie iloczynu energii magnetycznej $(BH)_{\max}$ charakteryzującego jakość magnesu trwałego dzięki wprowadzaniu coraz to nowych generacji materiałów (Rys.9) spowodowało ogromny wzrost jakości i miniaturyzację przetworników, a tym samym i urządzeń akustycznych. Obecnie jednak chciałoby się mieć przetworniki, które pozwalałyby na pełne wykorzystanie możliwości fotoniki, a więc działały bez pośrednictwa elektryczności, czyli bezpośrednio przetwarzały sygnał mechaniczny (akustyczny) w światło (i odwrotnie). Teoretycznie możliwość taką dawałyby materiały piezoluminiscencyjne, ale należą one jeszcze do przyszłości.

Chcąc analizować związki występujące pomiędzy materiałem i konstrukcją koniecznym staje się dokonanie kolejnej dygresji historycznej. Poglądy konstruktorów na materiał ukształtowały się w połowie XIX wieku, gdy rozwój kolejnictwa i związana z tym konieczność budowania coraz większych mostów zmusiły inżynierów lądowych do zainteresowania się mechanicznymi charakterystykami dostępnych materiałów i poszukiwania odpowiedzi na pytanie, jak się one zachowują pod wpływem działania siły (pierwszy metalowy most drogowy zbudowano z lanego żeliwa już w 1779 roku nad rzeką Severn w Anglii³⁹). W szerszym zakresie charakterystyki wytrzymałościowe stały się niezbędne inżynierom budowy coraz potężniejszych kotłów i maszyn parowych. Z kolei rozwój elektrotechniki zwrócił uwagę inżynierów elektryków na właściwości funkcjonalne (fizyczne) materiałów. Problem pojawił się w roku 1857 podczas budowy pierwszego transatlantyckiego kabla telegraficznego (który zresztą zerwał się podczas układania), gdy stwierdzono ze zdumieniem, że hiszpańska miedź „wysokiej jakości”, z której wykonywano ten kabel, ma oporność elektryczną kilkakrotnie większą od

³⁹ most ten stoi do dzisiaj!, Pierwszy most żeliwny na obecnych ziemiach polskich został zbudowany pod Strzegomiem na Dolnym Śląsku w 1794, miał on rozpiętość 13 m.

najlepszych znanych wówczas przewodników miedzianych. Jak wkrótce się okazało było to związane z obecnością w niej pewnych zanieczyszczeń. W tym samym czasie wynalazek prądnicy (Siemens 1866 r. , Gramme 1870 r.), a wkrótce (1873 r.) silnika elektrycznego zmusił konstruktorów do zainteresowania się właściwościami magnetycznymi.

Na przełomie stuleci ukształtował się pogląd, zgodnie z którym materiał był traktowany statycznie jako tworzywo o właściwościach zależnych od składu chemicznego oraz od przeprowadzonych na nim zabiegów technologicznych. Pogląd ten był związany z praktyką wynikającą z niewielkiej różnorodności dostępnych inżynierom nie wyspecjalizowanych materiałów przy równoczesnym braku znajomości zjawisk zachodzących w nich podczas przeróbki lub pracy. Dobór materiału na konstrukcję następował na drodze analizy pewnej stosunkowo wąskiej grupy wskaźników, charakteryzujących właściwości, a materiał stanowił przedmiot, a nie podmiot operacji technologicznych. Technolodzy, których zadaniem było wówczas przekształcanie materiału w narzucone przez konstruktorów kształty, również dysponowali ograniczonymi, znanymi od stuleci metodami takimi jak odlewnictwo, przeróbka plastyczna czy skrawanie (na przełomie stuleci opanowano umiejętność spawania metali⁴⁰) i interesowali się przede wszystkim rozwiązywaniem problemu masowej produkcji.

W takiej sytuacji niepewność co do zachowania się konstrukcji czy materiału w czasie pracy pokrywano przez przyjmowanie wysokich współczynników bezpieczeństwa. Polegało to na wykonywaniu części z dużym, określonym odpowiednimi przepisami, zapasem wytrzymałości, a więc o pewną krotność mocniejszych, niż by to wynikało z obliczeń. Materiał więc istniał w świadomości jako skatalogowany zbiór wartości liczbowych, a rola doboru materiału i jego wpływu na konstrukcje była bierna. Procedura ta zawierała stosunkowo mało ryzyka, ale nie zapewniała wysokiej stopy zysku produkcji i prowadziła do nadmiernego zużycia materiałów.

Postęp w zakresie specjalizacji materiałów i uzyskiwanie na tej drodze nowych jakości, oraz zrozumienie roli, którą w kształtowaniu właściwości i zachowania spełnia wewnętrzna budowa materiału, stworzył dla konstruktorów nową sytuację. Z jednej strony uzależnił ich od materiału w większym niż kiedykolwiek stopniu, z drugiej natomiast, dał do ręki niezwykle możliwości realizacyjne. Poza tym dzisiejszy proces projektowania np. konstrukcji mechanicznej, uwzględniający zarówno ryzyko awarii, jak i przewidywany czas życia konstrukcji, nastawiony jest już nie na projektowanie „na zapas” ale na jak najekonomiczniejsze wykorzystanie materiału. Projektowanie prowadzi się więc jakby od drugiej strony. Awaria, czyli makroskopowe zniszczenie konstrukcji w zdecydowanej większości przypadków polega na tym, że gdzieś, w jakimś jej elemencie pojawia się niespodziewanie mikropęknięcie. Może to nastąpić w wyniku błędu popełnionego podczas projektowania, błędu technologii, czy też błędu w eksploatacji, ale skutek jest we wszystkich przypadkach jednakowy; działające na konstrukcję obciążenia doprowadzają do propagacji pęknięcia, zależnej bezpośrednio od oddziaływań występujących na poziomie atomowym. Ujawnia to potrzebę zrozumienia nie tylko makroskopowych, ale i mikroskopowych aspektów zachowania się materiału poddanego wpływowi oddziaływania bodźców zewnętrznych. Jest to tym bardziej niezbędne im bardziej zbliżamy się ku wykorzystywaniu materiałów, które same są konstrukcjami, im bardziej konstrukcje są skomplikowane i w im większym stopniu ich praca odbywa się w złożonych, a nieraz i ekstremalnych warunkach.

⁴⁰pierwszy most spawany na świecie powstał w 1927 Polsce nad rzeczką Studnią pod Łowiczem. Most ten istnieje do dzisiaj, można go zobaczyć z szosy Sochaczew-Łowicz. Jego projektantem był inż. Bryła (1886-1943) profesor Politechniki Lwowskiej, a później Warszawskiej..

Stopniowe przechodzenie od fazy wynalazków inżynierskich do fazy odkryć naukowych, związanej nie tylko z rozwojem nowych materiałów i nowych technologii, ale ze zwiększoną konkurencyjnością na wyspecjalizowanym rynku doprowadziło do radykalnej zmiany filozofii konstruowania zmuszając do głębokiego wykorzystywania wszystkich możliwości tkwiących w materiale. Sprowadza się ona do głębokiego wykorzystywania nie tylko wiedzy o materiale, ale i bardzo złożonych i silnych wzajemnych zależności, występujących między technologią, materiałem i gotowym wyrobem.

W prosty, ale wymowny sposób związku te można przedstawić na przykładzie samochodu. Opanowanie w latach trzydziestych metod masowego kształtowania blach karoseryjnych w prasach pozwoliło nadać samochodom opływowe kształty, ale wymagało to też rozwiązania problemu stali głęboko tłocznych. Ponieważ mimo uzyskanego w tym zakresie postępu możliwości formowania blachy stalowej są ograniczone, więc karoseria musiała składać się z bardzo wielu łączonych na drodze zgrzewania elementów, oraz wymagała skomplikowanych zabiegów zabezpieczających ją przed korozją. Sytuacja zmieniła się, gdy elementy karoserii zaczęto wykonywać na drodze wtryskiwania poliestrów zbrojonych włóknem szklanym (czy węglowym). W przypadku klapy bagażnika pochodzącego z początku lat osiemdziesiątych samochodu Citroen DX pozwoliło to zintegrować w trzech częściach funkcje, które w poprzednim modelu samochodu spełniało aż 27 elementów. Nastąpiło więc znaczne obniżenie kosztów wytwarzania oraz zmiana obiektu przez nadanie mu kształtu, który byłby w przypadku zastosowania blachy stalowej niemożliwy (lub zbyt kosztowny) do uzyskania. Pojawiły się też i inne efekty: zwiększono sztywność, obniżono masę, zwiększono odporność korozyjną, zmniejszono zużycie lakierów. Ekonomiczne i ekologiczne skutki takich zmian omówiliśmy w poprzednim wykładzie.

Proces projektowania każdej, nawet najbardziej banalnej konstrukcji związany jest z podejmowaniem decyzji dotyczących wyboru materiału. Dobór materiału, rozumiany jako proces wzajemnego dopasowywania materiału i konstrukcji stanowi więc jedno z podstawowych zadań każdego inżyniera. Zadanie to stało się obecnie bardzo trudne, gdyż w przeciwieństwie do sytuacji istniejącej do połowy XX w., nie jest możliwe wybranie materiału tylko ze względu na jakąś jedną jego cechę, gdyż wzrost złożoności urządzeń zmusza nieraz do bardzo subtelnych kompromisów między zwykle przeciwstawnymi właściwościami. Doprowadziło to stopniowo do niesłychanie głębokiego wyspecjalizowania materiałów. Na przykład w budowie współczesnego samochodu zachodzi konieczność wykorzystania praktycznie wszystkich typów materiałów poczynając od szkła, poprzez gumę do stali, innych metali, polimerów, ceramiki, półprzewodników i kompozytów. Materiały te występują przy tym w bardzo wielu odmianach. Np. blacha stalowa, z której wykonane są elementy zderzaków powinna mieć inne właściwości niż stal przeznaczona na koła zębate w skrzyni biegów. Stal na zderzaki musi charakteryzować się wysoką wiązkością, czyli być miękka i plastyczna, tak aby dać się uformować na drodze walcowania i głębokiego tłoczenia bez pękania, oraz aby zderzak mógł absorbować energię przy uderzeniu. Stal na koła zębate natomiast powinna być mocna i odporna na uderzenia, aby zęby nie ulegały wyłamaniu w warunkach brutalnej pracy, a równocześnie powinna mieć twardą powierzchnię, zabezpieczającą zęby przed wytarciem. Zwróćmy również uwagę na to, że technologia ekonomicznego wykonywania koła zębatego wymaga aby zostało ono najpierw odkute a następnie obrobione na drodze dokładnej obróbki skrawaniem, a w tym celu powinno być miękkie. Operacji takich nie można by więc wykonać, gdyby stal miała na początku operacji swoje końcowe wymagane właściwości. Tak więc właściwości stali po zakończeniu obróbki nadającej kształt muszą ulec zmianie. W tym celu zostaje na niej przeprowadzona tzw. obróbka cieplna, polegająca na dokonaniu odpowiednich zabiegów nagrzewania i chłodzenia w wyniku których następuje zmiana mikrostruktury stali prowadząca do zmiany jej właściwości. Dodatkowo powierzchnie elementów możemy poddać zabiegom zmieniającym ich skład chemiczny, w wyniku których

następuje zmiana właściwości powierzchni materiału, jak np odporność na ścieranie i korozję.

Liczba materiałów, którymi obecnie dysponuje inżynier jest praktycznie nieograniczona. Istnieje wiele tysięcy różnych stopów metali, ilość gatunków tworzyw sztucznych przekracza 10 tysięcy, różnorodność dostępnych ceramiek stale rośnie. Co więcej, właściwości wielu z tych materiałów można regulować poprzez stosowanie odpowiednich zabiegów technologicznych. Stwarza to z jednej strony ogromne możliwości, a z drugiej - wielką przeszkodę we właściwym doborze materiału dla projektowanej konstrukcji. Materiał bowiem powinien mieć nie tylko odpowiednie właściwości (cena to też właściwość), ale też odznaczać się podatnością do nadania mu w ekonomiczny sposób wymaganego kształtu, musi również pozwalać na uzyskanie odpowiedniej jakości powierzchni. Wynika stąd wniosek, że dobór materiału na element konstrukcji nie może być dokonywany bez równoczesnego doboru technologii, za pomocą której ten element jest wykonywany. Co więcej, w rosnącej liczbie zastosowań użycie materiału wymaga bardzo głębokiego zrozumienia jego natury. Zadania te sprawiły, że obok inżyniera konstruktora, a później i technologa musiał się pojawić nowy typ inżyniera, specjalisty od materiałów. Wymagania te powiększa dodatkowo fakt, że skala, w której zachodzi projektowanie nowych, niezwykłych konstrukcji uległa niesłychanemu zmniejszeniu. W przypadku układów mikroelektronicznych czy fotonicznych dotyczy ono obiektów submikroskopowych w skali atomowej. Oglądając lity kawałek materiału, którym przy obserwacji nieuzbrojonym okiem wydaje się być kostka mikroprocesora nowej generacji trzeba rzeczywiście sporo wyobraźni, aby zdać sobie sprawę, iż mamy w ręku konstrukcję o stopniu złożoności przekraczającym największe zbudowane przez człowieka urządzenia mechaniczne. Projektując takie układy należy posługiwać się pojęciami mechaniki kwantowej i rozważać właściwości, które do niedawna badane były jedynie w laboratoriach naukowych.

Kończąc te rozważania na temat związków pomiędzy techniką i materiałami można postawić tezę, że tak jak w wieku XIX rozwiązywanie problemów technicznych stanowiło domenę konstruktorów, którzy dzięki wprowadzeniu matematycznych metod projektowania stworzyli podstawy współczesnej sztuki inżynierskiej, a w pierwszej połowie XX wieku domenę technologów, którzy skutecznie rozwiązali problem masowej produkcji, to obecne półwiecze stało się domeną materiałoznawców udostępniających nowe, nieosiągalne dotąd jakości. Co będzie dalej, do jakiej następnej ery musimy się przygotować? Trudno zgadnąć, futurologia jest bowiem zawodną profesją. Jednak życie już zmusiło do dodania do triady **konstrukcja - technologia - materiał** nowego elementu - **ekologii**, a główny kierunek działalności technicznej z konieczności dostrzegania istniejącego zagrożenia zwraca się właśnie ku problemom ratowania środowiska naturalnego, skutecznie zniszczonego sukcesami poprzednich epok.

6. STRUKTURA MATERIAŁÓW

If you want to understand functions, study structure (Francis H. C. Crick, What Man Pursuit, 1988)

Znamienną cechą materii jest to, iż posiada ona strukturę, a więc charakteryzuje się pewną wewnętrzną organizacją tworzących ją elementów. Nie jest to jednak jednoznaczna definicja, gdyż obejmuje ogromną różnorodność tych elementów, o rozciągłości sięgającej od odległości właściwych dla cząstek elementarnych, do niewyobrażalnych wymiarów wszechświata. Dla każdego ze szczebli tej hierarchii są charakterystyczne pewne wyróżniające go właściwości. Dzięki temu w celu analizowania wpływu jakie struktura wywiera na właściwości musimy dla każdego jej szczebla posługiwać się odpowiednimi dyscyplinami nauki. We wszystkich jednak przypadkach pierwsze szczeble, czyli te, które charakteryzują mikroświat cząstek elementarnych, są takie same. Natomiast wybór najwyższego stopnia hierarchii zależy od tego, którą z form materii chcemy badać: inaczej postąpimy rozpatrując np. organizację wszechświata, inaczej w przypadku żywego organizmu, a jeszcze inaczej gdy zajmujemy się materiałem, gdyż niezależnie od analizowanego przez nas szczebla, zawsze musimy uwzględnić zarówno poziom wyższy, na którym generowane są oddziaływania wywierane na rozpatrywaną strukturę, jak i niższy, opisujący jej elementy. Ponieważ docelowym zastosowaniem materiału jest konstrukcja, więc w naszym przypadku to ona właśnie będzie wyznaczała szczebel najwyższy. Wynika stąd, że obszar stosowanych przez nas metod badania struktur ograniczony jest od dołu (w skali mikroświata) przez mechanikę kwantową, a od góry (w skali makroskopowej) przez dyscypliny techniczne dotyczące konstrukcji dla których materiał jest przeznaczony, a więc przez mechanikę techniczną, elektrotechnikę, elektronikę itp.

Chcąc analizować materiał wygodnie jest rozróżnić siedem kolejnych szczebli zorganizowania materii : cząstkę elementarną, jądro atomowe, atom, cząsteczkę (molekułę), fazę, mikrostrukturę oraz konstrukcję (Rys 10).

Z tych wszystkich struktur faza i mikrostruktura mają dla materiału znaczenie naczelne, gdyż z nich wynika większość jego użytecznych właściwości. Mówiąc o strukturze materiału zwykle myślimy właśnie łącznie o tych dwóch szczeblach jej hierarchii. Ponieważ pojęcia te nie należą do powszechnej świadomości, musimy im poświęcić szczególną uwagę.

6.1. Faza

Każde ugrupowanie atomów czy cząsteczek przyjmuje pod wpływem warunków zewnętrznych (temperatura, ciśnienie) pewną równowagową, stabilną konfigurację, zapewniającą utworzonemu układowi najniższą z możliwych energię wewnętrzną. W układzie takim możemy wyróżnić jeden lub kilka jednorodnych fizycznie i chemicznie, ograniczonych przestrzennie obszarów o rozmiarach znacznie przekraczających rozmiar atomu, czy cząsteczek. Obszary te stanowią fazę. Faza jest więc jednorodną częścią niejednorodnego układu i jest oddzielona od pozostałych jego części granicami międzyfazowymi. Fazy rozróżniamy dzięki temu, że charakteryzują się różnym sposobem

ułożenia atomów w przestrzeni (różna gęstość) lub/i różnym składem chemicznym. Wynika stąd, że fazą może być czysty składnik (pierwiastek), roztwór tego pierwiastka z innymi lub związek.

Możemy mieć do czynienia z fazami gazowymi (stan gazowy), ciekłymi (stan ciekły) i stałymi (stan stały czyli skondensowany). Każda z nich jest stabilna tylko w określonym przedziale temperatur T , ciśnień p i składu chemicznego C . Zmieniając dowolny z wymienionych parametrów możemy więc wywołać zmianę warunków równowagi, przyczyniając się do zmiany stanu skupienia danej substancji, czyli powodując jej przemianę fazową. Na tej podstawie wykreśla się mapy, nazywane wykresami równowagi fazowej, pokazujące jakie fazy będą występowały w danych warunkach (Rys.11). Informacji o stanach równowagowych materiału i przemianach fazowych dostarcza nam *Termodynamika*, której prawa pozwalają na związanie energii systemu ze zmiennymi zewnętrznymi.

Jak stwierdziliśmy, wyróżnialność fizyczna faz wynika ze sposobu w jaki są uporządkowane tworzące je atomy, w jaki sposób ta faza jest zbudowana. W fazach gazowych atomy rozmieszczone są statystycznie w nieskoordynowach, czyli pozbawionych bliskich powiązań z sąsiadami układach, nie wykazujących uporządkowania ani bliskiego ani dalekiego zasięgu. Dzieje się tak dlatego, że, wysoka energia kinetyczna cząsteczek gazu, która jak wiemy z kursu fizyki jest proporcjonalna do kT , gdzie k jest stałą Boltzmanna⁴¹, nie pozwala siłom przyciągania między atomowego na doprowadzenie do trwałego zbliżenia się do siebie atomów i ich kondensacji w stabilniejsze ugrupowania. Gęstość gazu jest więc mała, a ze względu na łatwą mieszalność atomów gaz zawsze tworzy tylko jedną fazę. Zmiana warunków termodynamicznych prowadząca do obniżenia energii kinetycznej atomów powoduje zwiększenie gęstości i utworzenie faz ciekłych, w których atomy znajdują się w bliższych względem siebie odległościach, dzięki czemu najbliższe otoczenie każdego atomu jest skoordynowane, chociaż nadal brak jest uporządkowania dalekiego zasięgu. Z punktu widzenia naszych zainteresowań, największe jednak znaczenie mają stabilne wymiarowo fazy skondensowane, które powstają, gdy atomy zbliżą się do siebie na tyle, że pojawią się między nimi działające na bardzo małe odległości siły wzajemnego przyciągania, które nazywamy wiązaniami. Siły te są zależne od składu chemicznego fazy i wywierają ogromny wpływ na jej właściwości. Ich naturę poznano dopiero w bieżącym stuleciu za sprawą osiągnięć fizyki kwantowej⁴².

6.1.1. Budowa faz stałych

Możemy wyodrębnić trzy typy faz skondensowanych, w zależności od sposobu ułożenia tworzących je atomów, a mianowicie fazy krystaliczne, fazy amorficzne i fazy cząsteczkowe. W przypadku większości nieorganicznych faz stałych ugrupowanie atomów ma charakter krystaliczny, co oznacza, że są one rozmieszczone w przestrzeni w powtarzalny sposób, a każdy atom ma ściśle określoną, jednakową liczbą sąsiadów, którą nazywamy liczbą koordynacyjną z . Warunkiem podstawowym dla utworzenia krystalicznego ciała stałego jest to, aby wiązania tworzące się między budującymi je atomami były niewysyczone, to znaczy aby istniała możliwość rozrastania się ciała w trzech wymiarach poprzez przyłączanie kolejnych atomów co zachodzi w procesie nazywanym krystalizacją. Kryształy zajmują szczególne miejsce wśród innych struktur o podobnych wymiarach, ponieważ ta sama reguła grupowania prowadzi do rozbudowania fazy od poziomu bezpośredniego otoczenia atomu, aż do wymiarów które mogą wynosić nawet dziesiątki centymetrów⁴³. W ten sposób atomy tworzą pewną przestrzenną sieć, zwaną siecią krystaliczną, a położenie każdego atomu w kryształce może zostać

⁴¹ $k=1,38 \times 10^{-23} \text{ J atom}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

⁴² pomimo to jednak nadal nie potrafimy teoretycznie obliczyć funkcji potencjału międzyatomowego dla większości substancji

⁴³ np. monokryształy krzemu wytwarzane dla przemysłu elektronicznego

jednoznacznie opisane za pomocą kilku zaledwie parametrów geometrycznych i zobrazowane przez tzw. komórkę elementarną, co wynika z wysokiej symetrii tego układu i zachowania uporządkowania zarówno bliskiego jak i dalekiego zasięgu. Dzięki temu właściwości faz krystalicznych są powtarzalne. Problemy budowy krystalicznej faz stałych będą szczegółowo analizowane w ramach wykładów z *Krystalografii*.

Opisując model wyobrażający atomy w postaci piłeczek do tenisa stołowego łatwo stwierdzimy, że najgęstsze wypełnienie nimi przestrzeni występuje gdy każdy atom ma 12 przyległych sąsiadów, czyli gdy liczba koordynacyjna wynosi $z=12$. Takie zwarcie upakowane układy tworzą się łatwo jeśli wiązania między atomami mają charakter bezkierunkowy, jak to ma miejsce w przypadku metali. Zauważymy również, że istnieją dwa nierównoważne sposoby uzyskania zwartego upakowania atomów, w zależności od tego w jaki sposób położymy trzecią ich warstwę; może ona zostać umieszczona dokładnie nad pierwszą (układ ...ABABA..., Rys.12), albo być względem niej przesunięta, tak że dopiero czwarta warstwa będzie leżała nad pierwszą (układ ...ABCABCA..., Rys.13). W pierwszym przypadku otrzymujemy sieć heksagonalną zwartą (HZ) w której krystalizują np metale takie jak cynk, magnez i tytan, a w drugim natomiast sieć regularną ściennie centrowaną (RSC) w której krystalizuje np srebro, złoto, aluminium, miedź, nikiel i wysokotemperaturowa odmiana alotropowa żelaza (powyżej 910°C). Niektóre metale nie tworzą jednak zwarcie wypełnionych sieci: należą do nich np wolfram, molibden i żelazo (poniżej 910°C), które krystalizują w regularnym przestrzennie centrowanym (RPC) o liczbie koordynacyjnej $z=8$.

Istnieją fazy stałe o budowie innej niż krystaliczna. Duże znaczenie mają fazy amorficzne, będące w zasadzie przechłodzonymi cieczami i nie wykazujące w związku z tym uporządkowania atomów dalekiego zasięgu. Fazami takimi są np. szkła. Można je również otrzymać w metalach, które jak wspomniano, wykazują bardzo dużą łatwość krystalizacji, dzięki zastosowaniu gigantycznych prędkości chłodzenia ze stanu ciekłego. Występujące w ciałach organicznych fazy cząsteczkowe również mają zwykle charakter bezpostaciowy. Ich budulec stanowią jednak nie pojedyncze atomy, ale cząsteczki, czyli skończone wymiarowo grupy, zwykle łańcuchy silnie wzajemnie powiązanych ze sobą atomów. Ponieważ wiązania w obrębie cząsteczki są zwykle wysyczone, więc dla kondensacji ciała konieczne jest pojawienie się dodatkowych, z zasady znacznie słabszych wiążących te molekuly wzajemnych oddziaływań. Cechą wyróżniającą faz cząsteczkowych jest więc to, że wiązania wewnątrz cząsteczkowe są znacznie silniejsze od wiązań między cząsteczkami. W niektórych przypadkach układy cząsteczek mogą zostać uporządkowane tworząc trójwymiarową sieć analogiczną do sieci krystalicznej. Budowa faz cząsteczkowych zostanie omówiona w ramach wykładów z *Polimerów*.

6.1.2. Wiązania międzyatomowe

Jak wiemy, każdy atom⁴⁴ składa się z rdzenia jądrowego (a więc z jądra i silnie związanych z nim elektronów) oraz z pewnej liczby słabo związanych elektronów walencyjnych. Elektrony tworzą wokół jądra chmurę poruszając się w przestrzeni wyznaczonej wymiarami atomu. Całkowita liczba elektronów w stanie normalnym atomu, a więc w stanie neutralnym pod względem ładunku elektrycznego, odpowiada liczbie protonów w jądrze i tym samym równa jest liczbie atomowej. Stan stacjonarny elektronu (stan o stałej wartości energii) opisują cztery liczby kwantowe. Są to liczba n - główna liczba określająca poziom energetyczny elektronu, oraz liczby l , m i s charakteryzujące odpowiednio jego moment pędu, kierunek momentu pędu oraz spin, Zbiór stanów stacjonarnych o danej wartości głównej liczby kwantowej n nazywa się powłoką, zaś jego podzbiór o określonej wartości liczby l - podpowłoką.

⁴⁴ za wyjątkiem atomów gazów szlachetnych

Zgodnie z zakazem Pauliego w danym stanie stacjonarnym może znajdować się tylko jeden elektron. Z tego wynika, że liczba elektronów w poszczególnych powłokach i podpowłokach jest ograniczona. W przeciwieństwie do elektronów w rdzeniu jądrowym konfiguracja elektronów walencyjnych ulega silnym zmianom pod wpływem oddziaływania z otoczeniem. W większości pierwiastków zewnętrzna powłoka zawierająca elektrony walencyjne nie jest dokładnie wypełniona, a stopień niewypełnienia decyduje o podatności do tworzenia wiązań: albo tych elektronów jest zbyt wiele, w związku z czym mogą zostać łatwo oddane, a atom staje się donorem (dawcą) elektronu, albo też jest ich zbyt mało, a wtedy na zewnętrznej powłoce powstaje dziura elektronowa, dzięki czemu atom staje się akceptorem elektronu, a więc łatwo przyłącza nowy elektron. O pierwszych pierwiastkach mówimy iż są elektrododatnie (należą do nich wszystkie metale), o drugich, że są elektroujemne.

Zdelokalizowane elektrony w czasie swojego ruchu w sieci krystalicznej opisywane są w języku falowym. Jeżeli struktura jest doskonale periodyczna to zakłócenia ruchu falowego będą niewielkie (a więc przewodność będzie wysoka), jednak każda nieregularność (defekt) - powoduje zaburzenie ruchu elektronów. Zaburzenie budowy powłok elektronowych atomów znajdujących się w stanie skondensowanym i związana z tym możliwość przejścia elektronów walencyjnych do nieobsadzonych stanów energetycznych odpowiedzialne są za elektryczne, magnetyczne, dielektryczne i optyczne właściwości materiału, które można wydedukować analizując jego strukturę pasmową czym zajmuje się *Fizyka Ciała Stałego*.

W wyniku zbliżenia się atomów na odległość dostatecznie małą, aby zaczęły ze sobą oddziaływać, struktura ich powłok walencyjnych ulega pewnemu zaburzeniu, gdyż dochodzi wtedy do ich wzajemnego nakładania się. W wyniku tego poziomy energetyczne każdego atomu przechodzą w pasma, dzięki czemu powstaje charakterystyczna dla budowy krystalicznej struktura pasmowa. Dalsze zbliżanie atomów spowodowało by jednak, że na danych powłokach musiały by występować elektrony o takich samych stanach energetycznych, na co nie pozwala zakaz Pauliego. W wyniku tego niektóre z elektronów muszą przejść na wyższe stany energetyczne, co prowadzi do wzrostu energii układu i jest równoważne pojawieniu się sił odpychających. Dzięki tym siłom ciała stałe są nieściśliwe.

Natomiast siły przyciągające między atomami mają bardziej różnorodną naturę i zależą od rodzaju tych atomów, a więc od składu chemicznego materiału. W przyrodzie występują trzy typy silnych wiązań łączących ze sobą atomy (dlatego nazywamy je wiązaniami pierwotnymi): jonowe, kowalencyjne i metaliczne. Oprócz wiązań silnych występują dwa typy znacznie słabszych wiązań wtórnych: Van der Waalsa i wodorowe. Jak się okaże w jednym z dalszych wykładów właściwości faz na tyle silnie zależą od tego, które z tych wiązań dominuje, że na tej podstawie wprowadzono klasyfikację materiałów na ceramikę, polimery i metale.

TYP WIĄZANIA:	ENERGIA WIĄZANI A kJ/mol
JONOWE	625-1550
KOWALENCYJNE	520-1250
METALICZNE	100-800

Van der WAALSA oraz WODOROWE	< 40
---------------------------------	------

W metalach wszystkie elektrony walencyjne mogą oderwać się od swoich atomów, tworząc wspólny gaz elektronowy, poruszający się swobodnie między rdzeniami jądrowymi. Przyciąganie pomiędzy tym gazem a dodatnimi jonami powoduje powstanie niekierunkowych sił spójności i w związku z tym prowadzi to łatwego tworzenia struktur krystalicznych o wysokim stopniu upakowania.

Jeżeli ciało jest zbudowane z atomów pierwiastków metalicznych i niemetalicznych, to zgodnie ze swoją naturalną tendencją atomy metaliczne łatwo oddadzą swoje elektrony walencyjne, natomiast atomy niemetaliczne równie łatwo je przyłączają. W wyniku nastąpi przechwycenie elektronów od atomów metalicznych przez atomy niemetaliczne. Utworzone w ten sposób jony dodatnie (atomy metali straciły elektrony) i ujemne (atomy niemetalu zyskały elektrony) przyciągają się wzajemnie siłami kulombowskimi tworząc bardzo silne wiązanie jonowe. Upakowanie atomów w przestrzeni w przypadku wiązań czysto jonowych wywołane jest dwoma czynnikami. Po pierwsze dla zrównoważenia ładunków każdy jon musi zostać otoczony jonami przeciwnego znaku. Po drugie, charakter upakowania sieci będzie zależał od stosunku promieni atomowych tworzących ją jonów metalu r i niemetalu R . Dlatego też stopnie skoordynowania tych struktur mogą być bardzo różne (od $z=3$ gdy $r/R > 0,15$ do $z=12$ gdy R jest bliskie r), a budowa ich komórek elementarnych niezwykle złożona.

Gdy ciało jest zbudowane wyłącznie z pierwiastków niemetalicznych sytuacja jest inna. Pierwiastki te łatwo wzajemnie uśpólniają pary elektronów uzupełniając w ten sposób swoje zewnętrzne powłoki, w wyniku czego powstają wiązania kowalencyjne. Liczba sąsiadów każdego atomu zależy wtedy od liczby uśpólnionych par. Wiązania te mają silnie kierunkowy charakter, przez co atomy w stanie stałym muszą zajmować względem siebie ściśle określone kątoowo położenia. Wiązania kowalencyjne są nieco słabsze od wiązań jonowych, ale silniejsze do metalicznych. O naturze wiązań międzatomowych będzie mowa na wykładach z *Chemii*.

6.1.3. Przemiany faz

Wyjaśniliśmy, że właściwości faz stałych zależą zarówno od sposobu ułożenia atomów w przestrzeni jak i od zdeterminowanych składem chemicznym sił wiążących te atomy. Niezwykle silny wpływ obydwu czynników uwidacznia się np w przypadku węgla, który może występować w stanie stałym w trzech odmianach polimorficznych: jako grafit, diament i fulleren⁴⁵, różniących się od siebie sposobem ułożenia atomów w przestrzeni. Ponieważ węgiel ma cztery elektrony walencyjne, a zewnętrzna powłoka jego atomu może pomieścić łącznie 8 elektronów (czyli 4 pary), więc atom węgla może zostać związany kowalencyjnie z nie więcej niż czterema sąsiadami. W graficie jednak każdy atom węgla wykorzystuje tylko trzy z czterech możliwych wiązań kowalencyjnych tworząc silnie wewnętrznie związane dwuwymiarowe heksagonalne warstwy. Trójwymiarowa struktura grafitu powstaje w wyniku powiązaniu tych warstw słabymi siłami van der Waalsa (Rys. 14). Dzięki temu warstwy mogą się względem siebie łatwo przemieszczać na drodze poślizgu, co powoduje że grafit jest miękki i może być wykorzystywany jako smar, a ze względu na swój czarny kolor również w postaci ołówka. Grafit jest poza tym nieprzezroczysty i dobrze przewodzi prąd elektryczny. Siła wiązań kowalencyjnych nadaje jednak grafitowi wysoką wytrzymałość **wzdłuż** równoległych płaszczyzn heksagonalnych. Efekt ten wykorzystujemy przy wytwarzaniu włókien węglowych,

⁴⁵ fullereny zostały zaobserwowane po raz pierwszy w 1990 r przez W. Kratschmera i K. Fostiropoulosa z Instytutu Maxa Plancka w RFN. Nazwa fulleren nadano dla uczczenia nazwiska amerykańskiego architekta, IC Bud. Inżynieria i Wzrost, który wymyślił strukturę kopuły, przypominającą kształtem budowę cząstki tej postaci węgla.

będących niezbędnym składnikiem nowoczesnych materiałów kompozytowych. Swoją wielką wytrzymałość na rozciąganie zawdzięczają one temu, że w wyniku stosowania specjalnej technologii wytwarzania doprowadza się do ułożenia silnych wiązań kowalencyjnych wzdłuż osi włókna.

Natomiast w przypadku diamentu, który w wyniku przemiany fazowej zachodzącej zwykle pod wpływem łącznego działania bardzo wysokiego ciśnienia i temperatury możemy otrzymać z grafitu, wszystkie elektrony walencyjne zostają wykorzystane, przez co każdy atom tworzy wiązania kowalencyjne nie z trzema, jak w przypadku grafitu, ale z czterema sąsiadami, dzięki czemu musi powstać silnie powiązana struktura trójwymiarowa (Rys.15), nadająca diamentowi niezwykle właściwości: twardość, przezroczystość i cenę. Ze względu na brak wolnych elektronów walencyjnych diament w przeciwieństwie do grafitu nie przewodzi prądu, lecz gdy zostanie domieszkowany niewielką ilością pierwiastka zawierającego nadmiarowe elektrony (a więc metalu) staje się on półprzewodnikiem. Diament poza tym ma najwyższą wśród innych materiałów przewodność cieplną (5-krotnie wyższą niż srebro). Połączenie tych właściwości czyni z diamentu materiał niezwykle interesujący dla zastosowań w elektronice.

Trzecia postać węgla, fullereny są stabilnymi kryształami cząsteczkowymi zbudowanymi z nanometrowych, układających się w regularną zwarcie upakowaną sieć cząsteczek składających się z 60-ciu atomów i przypominających puste piłki (Rys.16). Każdy atom węgla w takiej cząstce ma, podobnie jak w graficie, trzech sąsiadów, tworzących jednak nie płaszczyznę, jak w przypadku grafitu, ale powiązaną kowalencyjnie sferyczną powłokę. Natomiast, podobnie jak w przypadku warstw grafitu wiązania między cząsteczkami-piłkami są słabe. Kryształy fullerenów są trwałe, łatwo rozpuszczalne, a ich temperatura sublimacji w próżni wynosi ok 400°C. Są miękkie jak grafit, lecz po ściśnięciu wykazują twardość podobną do diamentu. Fullereny istnieją w pyle międzygwiazdowym, są też obecne w dymie kopiącej świecy, ich syntezę można łatwo prowadzić np w wyładowaniu łukowym między dwiema grafitowymi elektrodami lub przez laserowe odparowywanie grafitu, pod warunkiem, że procesy te odbywają się w atmosferze helu. Znaczne zainteresowanie wzbudza obecnie możliwość uzyskiwania w kryształach fullerenowych właściwości nadprzewodzących i półprzewodzących. Można to osiągnąć poprzez domieszkowanie fullerenów metalicznymi atomami, które mogą łatwo zajmować położenia wewnątrz piłek, lub też między nimi.

Te ogromne różnice właściwości między grafitem, diamentem i fullerenem węglowym nie wynikają więc z różnic w ich składach chemicznych, który we wszystkich przypadkach jest przecież jednakowy, ale ze sposobu upakowania atomów w przestrzeni oraz z natury występujących między nimi wiązań.

Przemiany fazowe prowadzą więc nie tylko do wspomnianych zmian stanu skupienia, ale również i do zmian budowy fazowej w obrębie ciała stałego. Poza tym przy pewnych składach chemicznych może w obrębie ciała stałego równocześnie występować kilka znajdujących się we wzajemnej równowadze faz (mamy wtedy do czynienia z materiałami wielofazowymi). Z tej przyczyny wykresy fazowe, wykreślane w przestrzeni temperatura - skład chemiczny, zwane często wykresami równowagi, mają podstawowe znaczenie dla nauki o materiałach i inżynierii materiałowej, ponieważ pozwalają na przewidywanie budowy fazowej materiału, co stanowi pierwszy krok przy projektowaniu materiałów. Podstawy teoretyczne wykresów fazowych zostaną przedstawione w ramach wykładów z *Termodynamiki Stopów*, a ich zastosowaniom, w powiązaniu z budową fazową poświęcone są wykłady ze *Struktury Stopów*. Przemiany fazowe w stanie stałym oraz ich kinetyka są niezwykle istotnym elementem wiedzy o materiałach, gdyż ich zrozumienie i wykorzystanie pozwala na kształtowanie budowy fazowej stopów, dlatego też na III roku studiów poświęcony będzie im odrębny wykład. Budowę fazową badamy przede wszystkim metodami dyfrakcji promieni rentgenowskich, a ich skład chemiczny określamy różnymi metodami spektrograficznymi.

Nie zawsze fazy występujące w materiale odpowiadają warunkom równowagi, mogą również występować nietrwałe (metastabilne) fazy nie-równowagowe. W niektórych stopach można je łatwo otrzymać poprzez bardzo szybkie chłodzenie z wysokiej temperatury. W ten sposób, na przykład, poddając stal hartowaniu, czyli szybkiemu chłodzeniu z temperatury wyższej niż temperatura przemiany polimorficznej, doprowadzamy do wytworzenia bardzo twardej fazy noszącej nazwę martenzytu. Ponieważ faza ta jest nierównowagowa więc w wyniku wygrzewania następuje jej rozpad na dwie fazy równowagowe. Proces taki nosi nazwę odpuszczania i jest wykorzystywany w praktyce do kształtowania właściwości stali.

6.2. Mikrostruktura

Mówiąc o budowie fazowej w odniesieniu do faz krystalicznych, posługujemy się pojęciem jej doskonałości z punktu widzenia idealnego, opisanego za pomocą sieci krystalicznej równowagowego ułożenia atomów (czy cząsteczek) w przestrzeni. Idealna budowa fazowa jest jednak pojęciem abstrakcyjnym, gdyż w sieci krystalicznej występuje zawsze wiele zaburzeń, nazywanych defektami. Ponieważ układ atomów danej fazy jest ściśle geometrycznie określony przez typ jej sieci krystalicznej, więc defekty tego układu będą również miały geometryczny charakter stanowiąc odpowiednio punktowe, liniowe (Rys.17), powierzchniowe (Rys.18) względnie objętościowe zaburzenia porządku ułożenia atomów w sieci. Poza tym stopy metaliczne zbudowane są zwykle z dwóch (lub nawet więcej) faz, które przy zachowaniu tego samego udziału objętościowego, wynikającego ze składu chemicznego materiału mogą być bardzo różnie rozmieszczone w przestrzeni. Zarówno obecność defektów jak i sposób rozmieszczenia faz w decydujący sposób wpływa na właściwości i zachowanie materiału. Tak więc chcąc scharakteryzować materiał musimy nie tylko określić jego skład chemiczny i budowę fazową, ale również opisać wszystkie zaburzenia tej budowy czyli jej mikrostrukturę.

Mikrostrukturą nazywamy więc zestaw cech, opisujący przestrzenne rozmieszczenie faz oraz występujących w obrębie tych faz lub między nimi wszelkiego rodzaju defektów budowy fazowej. Z definicji tej wynika, że mikrostruktura jest z natury metastabilna, gdyż obecność defektów związana jest z odejściem budowy fazowej od stanu równowagowego o najniższej energii, oraz że w praktyce każdy materiał ma mikrostrukturę⁴⁶. Skład mikrostruktury, tzn. liczba i sposób rozmieszczenia poszczególnych jej elementów jest uwarunkowany technologią syntezy i przetwarzania materiału, może też zmieniać się pod wpływem przyłożonych bodźców, poza tym elementy mikrostruktury mogą przemieszczać się i wzajemnie ze sobą oddziaływać. Metastabilność mikrostruktury może wynikać również z jej niejednorodności, to znaczy z nierównomiernego rozmieszczenia elementów. Dzięki metastabilności mikrostruktury możemy ją poddawać naszej kontroli, co daje nam narzędzie do sterowania znaczną grupą właściwości materiałów.

W tradycyjnym znaczeniu termin mikrostruktura odnosi się do obrazu obserwowanego za pomocą mikroskopu. Interesujący nas poziom charakteryzują obiekty o wymiarach sięgających od odstępów między-atomowych do milimetrów, toteż znaczenie tego terminu ulegało rozszerzaniu w miarę wprowadzania nowych technik obserwacji o coraz to większej zdolności rozdzielczej⁴⁷. Początkowo były to powiększenia rzędu kilkuset razy uzyskiwane w optycznych mikroskopach metalograficznych (Sorby, 1883), które przez 70 lat stanowiły podstawowe narzędzie badania mikrostruktury. Pozwalały one na obserwowanie rozmieszczenia faz w stopach wielofazowych oraz ziarnistości na

⁴⁶ jedyny wyjątek stanowią bezdefektowe monokrystały

⁴⁷ Znajduje to swoje odzwierciedlenie w powszechnie stosowanej terminologii rozróżniającej **makrostrukturę** jako to co można obserwować okiem nieuzbrojonym, **mikrostrukturę** jako cechy ujawniane przy pomocy mikroskopu optycznego, i wreszcie **substrukturę** obserwowaną metodami mikroskopii elektronowej. Z fizycznego punktu widzenia taka klasyfikacja jest jednak pozbawiona uzasadnienia.

wytrawionych chemicznie powierzchniach próbek materiału (Rys.19). Ziarnistość stanowi najbardziej charakterystyczną cechę mikrostruktury i niejednokrotnie można ją dostrzec nawet nieuzbrojonym okiem, np na powierzchni ocynkowanej blachy, lub na przelomie pękniętego kruchego metalu. Pochodzi ona stąd, że ciała krystaliczne mają zwykle postać polikryształów, czyli że zbudowane są z pojedynczych krystalitów - ziarn, których liczba odpowiada liczbie zarodków utworzonych w czasie krystalizacji lub przemiany fazowej metalu (albo ziarenek proszku podczas spiekania ceramiki)⁴⁸. Powierzchnie rozdzielające te kryształki nazywamy *granicami ziarn*. Są one dwuwymiarowymi defektami budowy fazowej, ponieważ sieci krystaliczne stykających się ziarn są niejednakowo zorientowane w przestrzeni, a upakowanie atomów na powierzchni międzykrystalicznej jest gorsze niż w idealnej sieci. Dzięki temu miejsca wyjść granic ziarn na powierzchnię próbki mogą zostać selektywnie wytrawione odpowiednio dobranymi odczynnikami chemicznymi przez co stają się widoczne pod małym powiększeniem jako ciemne linie (Rys.19). To spowodowało, iż stanowiły pierwszy rozpoznany defekt mikrostruktury, mimo, że ich rzeczywista grubość nie przekracza 2-3 odległości międzyatomowych, a więc znajduje się poza zasięgiem zdolności rozdzielczej mikroskopu optycznego. Wielkość ziarna możemy łatwo regulować zarówno w czasie krystalizacji jak i poprzez pewne zabiegi technologiczne wykonywane w stanie stałym. Wynika to ze szczególnej właściwości granic ziarn, którą jest ich zdolność do przemieszczania się pod wpływem wyżarzania w wysokich temperaturach. Ruch (migracja) granic powoduje zwiększenie wymiarów ziarn: dzieje się to zwykle w ten sposób, że ziarna większe rosną kosztem ziarn mniejszych, chociaż w niektórych przypadkach mamy do czynienia z sytuacją odwrotną. Zainteresowanie granicami ziarn związane jest z faktem, iż wywierają one silny wpływ na właściwości materiałów, między innymi dlatego, że stanowią przeszkodę dla ruchu dyslokacji.

Obserwacja szczegółów mikrostruktury wymagała jednak znacznie większych zdolności rozdzielczych, niż te, które były dostępne w mikroskopie świetlnym. Osiągnięto je za pomocą mikroskopu elektronowego (Ruska 1931r. nagroda Nobla w 1986 r.) w którym wykorzystano wiązkę elektronów do prześwietlania cienkiej folii materiału (mikroskop elektronowy transmisyjny). Stosując powiększenia rzędu dziesiątków tysięcy razy zaobserwowano liniowy element mikrostruktury czyli dyslokację (Hirsch 1954 r.). Istnienie dyslokacji zostało przewidziane teoretycznie dwadzieścia lat wcześniej, a ich znaczenie wynika stąd, że pod wpływem działania naprężeń dyslokacja może się łatwo poruszać (ślizgać) wzdłuż najgęściej upakowanych płaszczyzn atomowych, powodując przemieszczanie się względem siebie części kryształu leżących po obydwu stronach tych płaszczyzn o jeden odstęp międzyatomowy. Dyslokacje mają zdolność do powielania się, a pod wpływem naprężenia ich liczba rośnie. W wyniku ruchu dostatecznie dużej liczby dyslokacji pojawia się makroskopowe odkształcenie plastyczne⁴⁹. Wzrost ich liczby powoduje z kolei wzrost naprężeń wewnętrznych w materiale i wywołuje jego umocnienie, czyli wzrost naprężenia potrzebnego do dalszego odkształcania. Dyslokacje są więc odpowiedzialne zarówno za to, że możemy zgiąć drut metaliczny, jak też i za to, że w miarę kolejnych przegięć staje się on coraz mocniejszy, aż wreszcie pęka, gdy liczba znajdujących się w nim dyslokacji będzie już tak wielka, iż możliwość ich ruchu zostanie wyczerpana. Ponieważ ruch i oddziaływanie dyslokacji są odpowiedzialne za właściwości mechaniczne ciał krystalicznych, więc na III roku studiów zostanie im poświęcony odrębny wykład.

Mikroskopia elektronowa pozwoliła nam nie tylko na badanie dyslokacji, ale również umożliwiła znacznie głębsze badanie granic ziarn (Rys.20) oraz innych niż dyslokacje elementów mikrostruktury, przede wszystkim uprzednio nierozpoznawalnych

⁴⁸ zwykle wielkość ziarna polikryształów wynosi od kilku do kilkuset mikrometrów . Obecnie znaczenia nabierają materiały w których, dzięki specjalnym metodom syntezy uzyskano wielkość ziarna rzędu nanometrów (t.zw. materiały nanokrystaliczne)

⁴⁹ łączna długość linii dyslokacji w centymetrze sześciennym odkształconego metalu może wynosić 10^{12} cm

submikroskopowych wydzielen. W ostatnich latach mikroskopia elektronowa uległa dalszemu udoskonaleniu dzięki opracowaniu wysokonapięciowych metod o wysokiej rozdzielczości co pozwala na ujawnienie położenia kolumn atomowych w sieci krystalicznej. Na Rys.21 przedstawiono obraz położenia atomów w pobliżu granicy ziarna. Porównanie tego zdjęcia z obrazem uzyskanym za pomocą mikroskopu optycznego pokazuje dobrą drogę, po której dochodziliśmy do wnikania w mikrostrukturę.

Metody mikroskopii elektronowej nie pozwalają jednak na ujawnienie kolejnego, najmniejszego defektu budowy fazowej którymi są defekty punktowe. Stało się to możliwe dzięki innej technice mikroskopowej a mianowicie mikroskopii jonowej polowej (Muller 1936, rozdzielczość atomową uzyskano w latach pięćdziesiątych). Defekty punktowe stanowią najprostszy typ zaburzenia sieci krystalicznej, przy czym występować mogą jako wakanse czyli puste, nieobsadzone węzły sieci, lub też (rzadziej) jako atomy międzywęzłowe, czyli atomy znajdujące się w nieprawidłowym, niewęzłowym położeniu. Wakanse tworzą się bardzo łatwo. Z warunków termodynamicznych można obliczyć, że pewna ich liczba występuje w każdej sieci krystalicznej i rośnie wykładniczo z temperaturą. Ze względu na łatwość przemieszczania się w sieci, wakanse odgrywają podstawową rolę w zjawiskach transportu masy w ciele stałym, czyli dyfuzji.

Między technologią materiału i jego mikrostrukturą z jednej strony a mikrostrukturą i właściwościami oraz zachowaniem materiałów z drugiej strony występują złożone związki, stanowiące jeden z głównych przedmiotów zainteresowania nauki o materiałach i inżynierii materiałowej. Wynika to stąd, że dla zmodyfikowania właściwości materiałów należy nie tylko odpowiednio ukształtować jego budowę fazową ale również trzeba dokonywać nieraz bardzo subtelnych zmian w jego mikrostrukturze, co możemy osiągnąć na drodze zabiegów technologicznych wykonywanych na materiale. Z drugiej strony niejednokrotnie zdarza się, że zarówno budowa fazowa, jak i mikrostruktura materiału ulegają istotnym zmianom pod wpływem warunków pracy. W obydwu przypadkach prowadzą one do zmiany charakterystyki materiału. Zależności te mają ogromne znaczenie praktyczne.

7. KLASYFIKACJA MATERIAŁÓW

Z przedstawionych dotąd rozważań wynika wielość metod klasyfikowania materiałów, przy czym różnią się one między sobą zarówno stopniem subiektywności, jak i praktyczną przydatnością. Możemy na przykład posłużyć się kryteriami dychotomicznymi, opartymi na wyrażonym wartościowo dodaną udziale intelektu w wytwarzaniu materiału, wyróżniając w ten sposób materiały konwencjonalne i zawansowane, lub naturalne i syntetyczne. Możemy również zastosować kryteria związane z masowością produkcji, wyróżniając materiały powszechnego i specjalnego zastosowania. Większą użyteczność mają jednak klasyfikacje oparte na kryteriach odnoszących się do natury materiału (budowy fazowej) lub też wynikających z możliwych zastosowań związanych z funkcjami których spełnienia oczekujemy od materiału. Jednak żadna z tych klasyfikacji nie jest dokładna i pełna.

7.1. Klasyfikacja oparta na sposobie uporządkowania atomów

Podstawowa, pierwotna metoda klasyfikacji, którą powinniśmy stosować przy analizowaniu materiałów przyjmuje jako kryterium podziału cechy charakteryzujące jednoznacznie rodzaj przestrzennego układu atomów w obrębie fazy. Wyróżniamy więc materiały:

- krystaliczne
- amorficzne
- komórkowe

W wykładzie poświęconym budowie fazowej zdefiniowaliśmy już cechy charakteryzujące materiały krystaliczne i amorficzne. W materiałach komórkowych faza stała zawiera znaczną ilość rozproszonej fazy gazowej, co jest typowe dla wielu substancji naturalnych, jak np. kość, drewno i gąbka lub syntetycznych jak spienione polimery, a obecnie dla nowej grupy superlekkich materiałów syntetycznych jakimi są aerozele.

Potrzeba tej klasyfikacji pojawiła się stosunkowo niedawno i jest ona chyba najbardziej typowa dla współczesnej nauki o materiałach i inżynierii materiałowej. Jej stosowalność wynika stąd, że sposób ułożenia atomów w wyjątkowo silny i wyróżniający sposób wpływa na charakter i zachowanie faz. Klasyfikacja oparta na rodzaju ułożenia atomów daje wszystkim materiałom „równą szansę” przy ich doborze. Jest ona dodatkowo uzasadniona identycznością zarówno mechanizmów odpowiedzialnych za podstawowe właściwości, jak i metod badawczych stosowanych przy charakteryzacji materiału.

7.2. Klasyfikacja oparta na naturze wiązań międzyatomowych

Tradycyjna klasyfikacja materiałów opiera się na naturze wiązań utrzymujących atomy w skoordynowanych przestrzennie układach i determinujących podstawowe właściwości. Wyróżniamy w ten sposób trzy główne grupy materiałów:

- metale,
- polimery

- ceramiki

Oprócz tego należy tutaj wymienić również kompozyty, tworzone poprzez połączenie dowolnych dwóch wymienionych materiałów w monolityczną całość, dla uzyskania nowej jakości.

Rozszerzeniem tej klasyfikacji jest dosyć dowolny podział oparty bezpośrednio na składach chemicznych materiałów. Mówi się więc o materiałach nieorganicznych, wyróżniając wśród nich tworzywa metaliczne i niemetaliczne, oraz o materiałach organicznych, będących związkami węgla. W obydwu przypadkach można dokonać dodatkowego podziału na tworzywa naturalnie, czyli występujące w przyrodzie i syntetyczne czyli sztuczne. Każda z grup podlega dalszym podziałom na odpowiednie podgrupy. Metale dzielimy więc na stopy żelaza i metale kolorowe (czyli nieżelazne) a wśród tych ostatnich wyróżniamy metale lekkie, szlachetne, wysokotopliwe itd.; ceramiki na ceramiki tlenkowe, azotkowe, borkowe itd; polimery na poliwinyle, poliwinilidy, poliamidy, poluretany itd., a wśród kompozytów mamy wszystkie możliwe kombinacje w zależności od wchodzących w ich skład materiałów: np polimery zbrojne włóknem ceramicznym, metalowym czy polimerowym, metale wzmacniane włóknami metalowymi itd.. Wyróżnia się też dodatkowo takie grupy materiałów jak włókna, papier i karton oraz materiały pochodzenia biologicznego (materiały odnawialne, jak np drewno)

Podział materiałów na trzy wymienione podstawowe grupy jest użyteczny, ale w przeciwieństwie do klasyfikacji opartej na sposobie ułożenia atomów nie jest precyzyjny, gdyż, jak wiadomo istnieje wiele materiałów o charakterystykach pośrednich. W ramach każdej grupy materiałów występują różnice wynikające z odmienności atomów poszczególnych pierwiastków oraz odmiennych sposobów ich uporządkowania. Natomiast głębokie, wyczuwalne naszymi zmysłami różnice pomiędzy właściwościami wymienionych grup materiałów pochodzą od odmiennej natury wiązań chemicznych między atomami (lub cząsteczkami) i różnic w strukturze elektronowej. Zanalizujemy te różnice nieco dokładniej.

7.2.1 Metale

Metale (rozumiane tu jako metale i ich stopy) rozpoznajemy dzięki temu, że mają wysoką przewodność cieplną i niskie ciepło właściwe, wiemy także, iż odznaczają się przewodnością elektryczną i są nieprzezroczyste, poza tym można je polerować na wysoki połysk oraz poddawać odkształceniu plastycznemu. Wykazują odporność na udary. Możemy je też stopić i spawać. Metale odznaczają się wysoką podatnością do krystalizowania w czasie krzepnięcia, a chcąc doprowadzić je do stanu amorficznego należy stosować gigantyczne szybkości chłodzenia.

Charakterystykę tę metale zawdzięczają występującym w nich wiązaniom, typowym dla ciał zbudowanych z atomów pierwiastków metalicznych (około $\frac{3}{4}$ wszystkich pierwiastków mają wiązania metaliczne) które zapewniają swobodę uwspólnionym elektronom walencyjnym.

Swoboda elektronów w metalu pozwala im łatwo przenosić ładunek elektryczny, co nadaje metalom wysoką przewodność elektryczną. Ponieważ elektrony mogą również przemieszczać się z obszarów o wysokiej temperaturze do obszarów o niskiej temperaturze, więc transportując ze sobą część energii kinetycznej przyczyniają się tym samym do wysokiego przewodnictwa cieplnego. Połysk metaliczny, który, jak wspomniano, stanowi jedna z cech stanu metalicznego, wynika z podatności elektronów do drgań przy częstotliwości światła widzialnego - co jest również wynikiem częściowej niezależności elektronów od rodzimych atomów. Wiązanie metaliczne jest słabsze od wiązań kowalencyjnych i jonowych ale znacznie mocniejsze od wiązań międzycząsteczkowych. Widać to z porównania wartości modułów sprężystości. Upakowana struktura krystaliczna zapewnia im więc stosunkowo wysoką odporność na rozciąganie, ale równocześnie niewielką odporność na działanie sił ścinających, gdyż

przemieszczanie się materiału wzdłuż płaszczyzn krystalograficznych zachodzi stosunkowo łatwo. Dzięki temu metale są równocześnie wytrzymałe i plastyczne, co stanowi ich unikatową cechę, decydującą o bardzo wielu zastosowaniach. Wynika z niej możliwości wykorzystania przeróbki plastycznej dla nadawania metalom odpowiednich kształtów i mikrostruktury.

Aby utworzyły się wiązania metaliczne nie wszystkie atomy muszą być takie same, gdyż pozbawionym elektronów walencyjnych jonom atomów metalicznych jest obojętne jakie inne atomy znajdują się w ich sąsiedztwie. Można więc łatwo tworzyć stopy metaliczne czyli układy wieloskładnikowe składające się z więcej niż jednego pierwiastka, a skład stopu może zmieniać się w szerokich granicach i nie obowiązują go zasady stechiometrii. W niektórych przypadkach, przy określonych składach chemicznych pierwiastki metaliczne tworzą między sobą fazy międzymetaliczne. Fazy te, ze względu na występowanie w nich obok wiązań metalicznych także i innych typów wiązań, mogą mieć bardzo skomplikowane sieci krystaliczne i niezwykle interesujące właściwości, są też przedmiotem rosnącego zainteresowania.

Metale otrzymujemy z rud, które są najczęściej tlenkami, dlatego też procesy metalurgiczne polegają zwykle na redukcji (która doprowadza do ekstrakcji metalu z rudy) oraz rafinacji (która usuwa z metalu zanieczyszczenia pozostałe po redukcji). Zwykle części metaliczne wytwarzamy na drodze odlewania, przeróbki plastycznej lub obróbki skrawaniem, albo też przez połączenie tych technologii. Coraz częściej, szczególnie w przypadku stopów będących fazami międzymetalicznymi wykorzystuje się typową dla materiałów ceramicznych technologię spiekania. Bardzo często zachodzi potrzeba nadania powierzchni części metalicznych szczególnych właściwości np. zwiększających ich odporność na ścieranie lub też poprawiających odporność korozyjną. W tym celu możemy zmienić budowę fazową powierzchni poprzez zmodyfikowanie jej składu chemicznego. Problemami tymi zajmuje się dział inżynierii materiałowej zwany *inżynieria powierzchni*.

7.2.2 Ceramiki

Słowo ceramika pochodzi od sanskryckiego *keramos* oznaczającego rzecz otrzymaną w wyniku działania ognia, a więc w zasadzie odnosi się ono nie do natury materiału, ale do technologii jego otrzymywania. I rzeczywiście, do dnia dzisiejszego pojęcie to jest bardzo pojemne i niejednoznaczne. Najczęściej stosujemy je wobec stechiometrycznych związków jonowo połączonych jednego, lub kilku pierwiastków metalicznych z niemetalicznymi (głównie z tlenem, azotem, węglem lub borem). Do ceramiki zaliczamy jednak również i wspomniany w poprzednim wykładzie diament, składający się wyłącznie z połączonych kowalencyjnie atomów węgla, oraz krzem i german które mają takie same jak diament sieci krystaliczne. Podgrupę ceramiki stanowią szkła, które są krzemianami powiązanymi mieszanymi wiązaniami jonowo kowalencyjnymi, oraz grafit czy selen, w których mamy do czynienia z mieszaniną wiązań kowalencyjnych i van der Walsa. Wreszcie ceramikę stanowi kryształ lodu, w którym dominują wiązania wodorowe.

Na pierwszy rzut oka podane klasyfikacja wydaje się nierozsądna, ale przecież piękny, przezroczysty kryształ szafiru jest dokładnie tym samym materiałem co tradycyjnie zaliczany do ceramik izolator świcy samochodowej. Różnica między nimi polega, jeżeli nie brać pod uwagę ceny, wyłącznie na mikrostrukturze, gdyż o ile w pierwszym przypadku jest to naturalny lub sztucznie wychodowany monokryształ domieszkowanego Al_2O_3 , to w drugim - mamy do czynienia z polikryształem, zbudowanym z wzajemnie zespolonych, różnie zorientowanych maleńkich ziarn, dodatkowo zawierającym wiele zanieczyszczeń, co łącznie powoduje zmniejszenie jego przezroczystości.

Najłatwiej więc jest zdefiniować ceramiki przez wykluczenie: są to niemetaliczne niepolimery. Większość z nich wykazuje się wysoką twardością i kruchością, odznaczają się też większą do metali odpornością na działanie wysokich temperatur i agresywność środowiska, oraz małą przewodnością i rozszerzalnością cieplną. Ceramiki są w

zasadzie izolatorami, ale niektóre wykazują właściwości półprzewodnikowe, a niedawno odkryte wysokotemperaturowe nadprzewodniki również są ceramikami⁵⁰.

Cechy te wynikają z natury występujących w ceramice wiązań jonowych, jonowo-kowalencyjnych lub kowalencyjnych. Dzięki temu powstaje uporządkowana struktura krystaliczna, w której poszczególne rodzaje atomów zajmują ściśle określone położenia. Można również otrzymać ceramikę amorficzną (szkła ceramiczne). Ponieważ charakter wiązań powoduje, że elektrony są unieruchomione, więc typowa ceramika jest dobrym izolatorem elektrycznym. Przenoszenie ciepła jest również utrudnione, ponieważ energia cieplna musi być przenoszona w całości przez drgania cieplne atomów, co jest znacznie powolniejszym procesem niż charakterystyczny dla metali transport elektronowy. Mało ruchliwe elektrony w ceramice mają niewielkie możliwości do dopasowywania swoich drgań do częstotliwości światła i przez to słabo absorbują promieniowanie widzialne. Dzięki temu ceramika wykazuje tendencję do przezroczystości, szczególnie gdy ma postać monokrystaliczną. Ceramika polikrystaliczna, którą wytwarza się na drodze spiekania proszku nigdy nie jest w pełni jednorodna, gdyż jej mikrostruktura zawiera znaczną liczbę drobnych mikroszczelin, które przyczyniają się do rozproszenia światła i zmniejszenia przezroczystości. Istnieją znaczne możliwości manipulowania strukturą elektronową ceramiki, co, jak wspomnieliśmy, pozwala na otrzymanie w nich właściwości półprzewodnikowych (krzem, german) a nawet nadprzewodzących (np $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$)

Dzięki naturze występujących wiązań, ceramiki charakteryzują się wysoką wytrzymałością (wysoka twardość). Jednak wytrzymałość ta nie jest związana tak jak w przypadku metali z plastycznością, ze względu na znacznie większą oporność na działanie sił ścinających. W przeciwieństwie bowiem do metali przemieszczenie względem siebie płaszczyzn krystalicznych prowadzi w większości ceramiki do zmiany rozłożenia ładunku elektrycznego, czemu przeciwstawiają się siły kulombowskie. Dzięki temu odpowiedzią materiału na przyłożone naprężenie będzie nie odkształcenie plastyczne, ale pęknięcie. Stanowi to, łącznie z występującymi w ceramice mikroszczelinami, które są dogodnymi miejscami inicjacji pęknięć, powód jej kruchości.

Przyczyna odporności ceramiki na działanie wysokich temperatur (żarodporność) i oddziaływanie agresywnych środowisk wynika nie tylko z siły wiązań, ale i z tego, że składa się ona zwykle z silnie utlenionych związków.

Ceramikę wytwarzało się dawniej z surowców mineralnych (ceramika klasyczna), a obecnie coraz częściej na drodze syntezy substancji nie występujących w stanie naturalnym (np. azotek boru BN), które otrzymuje się w postaci bardzo drobnych proszków, poddawanych następnie precyzyjnym procesom zagęszczania i wysokotemperaturowego spiekania, często w warunkach wysokiego ciśnienia hydrostatycznego, w celu nadania materiałowi odpowiedniego kształtu lub też procesowi krystalizacji (przy wykonywaniu monokryształów).

7.2.3 Polimery.

Polimery, często nazywane plastikami, lub tworzywami sztucznymi są materiałami organicznymi, czyli zbudowanymi ze związków węgla. Mają niską gęstość i charakteryzują się właściwościami izolacyjnymi, zarówno cieplnymi jak i elektrycznymi. Słabo odbijają światło, wykazując tendencje do przezroczystości. Wreszcie wiele z nich jest giętkich i odkształcalnych, ale nie nadają się do pracy w podwyższonych temperaturach.

Polimery są łańcuchowymi makrocząsteczkami, których ogniwami są identyczne mery (od greckiego *meros* czyli część), zbudowane z przestrzennych grup atomów węgla i

⁵⁰Miller i Bednorz 1987, nagroda Nobla 1988

innych niemetalicznych pierwiastków z prawego górnego rogu układu okresowego. Atomy te łatwo wzajemnie uśpólniają pary elektronów, co tworzy między nimi silne, kierunkowe wiązania kowalencyjne. Ponieważ każdy elektron walencyjny zostaje związany z określoną parą atomów w obrębie makrocząsteczki (łańcucha merów) i jej ładunek elektryczny jest praktycznie zrównoważony (niepolarny) to poszczególne makrocząsteczki związane mogą być ze sobą jedynie znacznie słabszymi oddziaływaniami wtórnymi, chociaż można doprowadzić do utworzenia między łańcuchami dodatkowych silnych połączeń atomowych (tzw. usieciowienie). Zwykle poszczególne łańcuchy są silnie skłębione. W niektórych polimerach, o niewielkim stopniu usieciowienia łańcuchy te pod wpływem przyłożonego obciążenia mogą jednak ulegać odwracalnemu prostowaniu, co prowadzi do pojawienia się niezwykle wysokiej podatności do odkształceń nietrwałych, czyli elastyczności. Polimery wykazujące tę cechę nazywamy elastomerami lub gumami.

Giętka struktura wzajemnie słabo powiązanych elastycznych makrocząsteczek łatwo przechodzi pod wpływem temperatury w stan lepki. Tworzywa wykazujące tę cechę nazywamy termoplastycznymi, proces nadawania kształtu nie powoduje zmian ich właściwości. Usieciowanie polimeru doprowadza do nieodwracalnego wzrostu sztywności (tzw. tworzywa termoutwardzalne). W termoplastycznym kauczuku zmianę właściwości elastycznych osiągamy na drodze wulkanizacji⁵¹ wykorzystując do wprowadzenia połączeń między łańcuchami atomy siarki. Jeżeli jednak połączeń tych będzie zbyt wiele zamiast wytrzymałej elastycznej gumy otrzymamy kruchy i twardy ebonit. Tak więc tworzywa termoutwardzalne nabywają swoich właściwości w operacji, która musi być związana z nadawaniem im kształtu (jak to ma miejsce we wspomnianym już przypadku wulkanizacji gumy). Możemy wreszcie doprowadzić do utworzenia polimerów, w których mery tworzą niechaotycznie rozmieszczone w przestrzeni łańcuchy, nadające materiałowi budowę amorficzną, ale trójwymiarową strukturę krystaliczną. Ponieważ zarówno budowa meru jak i stopień usieciowienia oraz krystalizacji mogą być kontrolowane w bardzo szerokim stopniu, stwarza to niezwykle możliwości uzyskiwania materiałów o różnorodnych wymaganych właściwościach.

Polimery możemy otrzymywać w wyniku modyfikacji pewnych polimerów naturalnych (np pochodnych celulozy), jednak głównym surowcem dla ich wytwarzania jest ropa naftowa.

7.2.4 Kompozyty

Materiały kompozytowe, czyli kompozyty, w zasadzie nie odpowiadają podanej kwalifikacji opartej na naturze wiązań i można je określić jako niejednorodną mieszaninę kilku trwale połączonych jednorodnych faz (lub materiałów). Idea materiałów kompozytowych wzięła się z potrzeby łączenia ze sobą różnych materiałów w celu przewyciężenia niedostatków tego z nich, którego inne właściwości są dla nas szczególnie użyteczne. Dzięki temu właściwości kompozytu są wyższe niż właściwości tworzących je faz. Najbardziej powszechne zastosowanie kompozytów związane jest z naśladowaniem znanych z przyrody naturalnych rozwiązań zapewniających niedościgłe połączenie ogromnej sztywności konstrukcji z jej lekkością. Przykładami takich niezwykle z mechanicznego punktu widzenia „konstrukcji” mogą być kość lub trzcina (albo drewno). Właściwości kości biorą się z tego, że twardy szkielet zbudowany z hydroksyapatytu (związku opartego na fosforanie wapnia) zespolony jest w jedną całość miękkimi organicznymi związkami proteinowymi, tworząc lekką strukturę komórkową. Właściwości trzciny wynikają z zespolenia sztywnych włókien celulozy przez miękką ligninę. Materiały kompozytowe stosowane są przez człowieka od bardzo dawna. Mało znanym a pięknym przykładem ich zastosowania była polska kopia husarska: niezwykle

⁵¹proces wulkanizacji gumy wynalazł Goodyear w 1839.

lekka, pusta w środku konstrukcja wykonana z klejonych włókien drewnianych: dlatego mówimy o kruszeniu, a nie o łamaniu kopii⁵²!

Wykorzystując wzorzec dostarczony przez przyrodę nauczyliśmy się wytwarzać materiały złożone, w których wykorzystujemy niezwykłą właściwość cienkich włókien, polegającą na tym, że ich wytrzymałość rośnie w miarę malenia średnicy. Włókna takie wykonujemy obecnie z materiałów o bardzo wysokim module sprężystości. Charakteryzują się one zwykle występowaniem mikroszczelin czy rysek powierzchniowych. Gdy szczelinki te osiągają wymiar większy od pewnej krytycznej wielkości powodują inicjację pęknięcia i związaną z tym kruchość. Jednak z miarą malenia średnicy włókna prawdopodobieństwo wystąpienia tych nieciągłości maleje. Poza tym zespolenie wielkiej liczby włókien jednorodną, zwykle polimerową, usztywniającą osnową, która utrzymuje je w wymaganym położeniu, sprawia, że pęknięcie jednego z nich nie doprowadza do zniszczenia konstrukcji, zapewniając jej wysoką sztywność i wytrzymałość. Te umacniane włóknami materiały stanowią obecnie główną grupę tworzyw kompozytowych, a ich podstawowe zastosowanie wynika z uzyskiwania na tej drodze niezwykle korzystnego stosunku sztywności do ciężaru właściwego (Rys 25).

Kompozyty mogą stanowić w zasadzie kombinację wszystkich rodzajów materiałów (Rys.26) i można z nich tworzyć układy zapewniające otrzymanie innych niż tylko mechaniczne właściwości i to nawet takich, które w materiale nie kompozytowym wystąpić nie mogą. Opiera się to na prostym pomysł, że z kompozytowego połączenia materiału o właściwościach X-Y z materiałem o właściwościach Y-Z otrzymamy właściwości X-Z, przyczym pierwsza litera oznacza bodziec, a druga reakcję. Na przykład przez połączenie dwóch materiałów, z których jeden wykazuje właściwości **piezo-**elektryczne a drugi **elektro-luminiscencyjne** można by otrzymać kompozyt o właściwościach **piezo-luminiscencyjnych**, który będzie się świecił, jeżeli zostanie poddany działaniu siły. Problem polega jedynie na tym aby reakcja wywołana w pierwszym z materiałów była dostatecznie wielka by stanowić wystarczający bodziec dla zainicjowania reakcji w materiale drugim.

7.3. Klasyfikacja oparta na użytkowych funkcjach materiałów

Równoległe z poprzednio wymienionymi stosowana jest klasyfikacja materiałów według spełnianych przez nie funkcji technicznych (zastosowań), niezależnie od tego czy są one metalami, ceramikami, polimerami lub kompozytami, oraz czy mają strukturę krystaliczną, względnie amorficzną. Wyróżniamy w ten sposób:

- tworzywa konstrukcyjne
- tworzywa funkcjonalne
- tworzywa biomedyczne
- tworzywa budowlane
- tworzywa włókniste

Każda z tych grup charakteryzuje się pewną odrębnością, mimo, że klasyfikacja ta nie jest ostra. W niektórych przypadkach trudno jest bowiem określić przynależność poszczególnych tworzyw, ponieważ należą one nie tylko do jednej grupy.

7.3.1. Tworzywa konstrukcyjne

Podstawowe zadanie, które spełniają tworzywa konstrukcyjne polega na przenoszeniu obciążeń, a więc ich najistotniejszą cechą jest wytrzymałość mechaniczna. Nie są one końcowymi produktami, gdyż służą do wykonywania części maszyn lub konstrukcji. Wśród nich wyróżniamy materiały przeznaczone do pracy w niskich i wysokich

⁵²Jedynie zachowane oryginalne egzemplarze kopii husarskich można oglądać na zamku w Kórniku

temperaturach (żaroodporne i żarowytrzymałe), materiały odporne na korozję, materiały narzędziowe i supertwarde, materiały łożyskowe, sprężynowe, materiały dla energetyki jądrowej itd. Często stosuje się tutaj dodatkową podklasyfikację opartą na wykoprzystaniu technologii przetwórstwa wyróżniając np wśród metali stopy odlewnicze, do przeróbki plastycznej, spawalne, czy o podwyższonej skrawalności, a wśród polimerów polimery termoplastyczne i termoutwardzalne. Rynek na materiały konstrukcyjne wykazuje rosnącą chłonność: poszukiwane są tworzywa tańsze, lżejsze, o wyższej sztywności, wyższej odporności korozyjnej, większej trwałości, oraz wysokiej efektywności obiegu surowcowego. Ze względu na masowość produkcji materiałów konstrukcyjnych znaczenie ma też wpływ technologii wytwarzania tych materiałów na środowisko naturalne.

7.3.2. Tworzywa funkcjonalne

Tworzywa funkcjonalne mogą, w przeciwieństwie do tworzyw konstrukcyjnych, same z siebie stanowić końcowy produkt, będący funkcjonalnym elementem (komponentem) konstrukcji, a to dzięki posiadaniu pewnych szczególnych właściwości, np magnetycznych (magnes), optycznych (kryształ lasera, włókno światłowodowe, elementy optoelektroniczne), elektrycznych (półprzewodnik, nadprzewodnik). Do grupy tej należą również materiały stosowane do bezpośredniej konwersji energii (materiały fotowoltaiczne, piezoelektryki) i wiele innych (porównaj tabl.2). Posługując się metodami projektowania inżynierskiego można z materiałów funkcjonalnych stwarzać układy, wykonujące zadania, spełniane poprzednio przez konstrukcje złożone (np kompozytowy przełącznik bimetaliczny) lub, co zdarza się coraz częściej, nie są możliwe do osiągnięcia innymi metodami, o czym wspomniano omawiając materiały kompozytowe. Materiały funkcjonalne stanowią obecnie najszybciej rozwijającą się i najbardziej zaawansowaną technologicznie grupę tworzyw o nierozpoznanych jeszcze w pełni perspektywach i wielkiej wartości dodanej. Odgrywają decydującą rolę w stymulacji rozwoju przemysłu elektronicznego i informatycznego, wpływając tym samym na wszystkie pozostałe dziedziny gospodarki.

7.3.3. Tworzywa biomedyczne

Są to materiały, które służą do wykonywania „części zamiennych” dla człowieka. Wśród nich mamy zarówno materiały konstrukcyjne (np sztuczne przeguby) jak i funkcjonalne (np syntetyczna skóra), lecz ze względu na zasadniczą dla ich pracy konieczność współdziałania z żywą tkanką biologiczną grupa ta stanowi wyraźnie wyodrębniony dział o rosnącym znaczeniu i znacznych sukcesach. Osobną pozycję zajmują materiały dentystyczne.

7.3.4. Tworzywa budowlane i włókniste

Tworzywa budowlane wykonywane z surowców mineralnych (cement, beton, gips itd) oraz odtwarzalne tworzywa włókniste, wykonywalne z surowców, których w sposób ciągły dostarcza natura (drewno, włókno naturalne, papier itd.), przerabia się za pomocą prostych technologii, nie ingerujących zbyt głęboko w ich naturę i z tego powodu nie będziemy zajmować się nimi w ramach naszych studiów .

8. WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁÓW

Różne materiały rozmaicie reagują na takie same bodźce. Wypolerowane metale odbijają padające światło, zmieniając jednak jego barwę. Natomiast szkło światłowodowe przepuszcza promieniowanie widzialne całkowicie, bez zmiany długości fali. Mówimy wtedy o tych materiałach, że jedno, tak jak metale, są nieprzezroczyste, a drugie, jak szkła i ceramika, są przezroczyste oraz że posiadają taki lub inny kolor. Ciała stałe, poddane małym odkształceniom powracają do początkowych wymiarów i kształtów po usunięciu bodźca którym jest obciążenie, inne natomiast substancje, jak np. plastelina - nie. O pierwszych mówimy, że są sprężyste, o drugich, że są lepkie. Tę reakcję materiału na przyłożony bodziec nazywamy jego właściwością. I tak nieprzezroczystość jest właściwością metali a przezroczystość - pewnych ceramik, sprężystość jest właściwością ciał stałych, lepkość zaś stanowi właściwość cieczy. We wszystkich przypadkach jakości reakcji na bodziec jest uzależniona od struktury materiału na pewnym szczególnym poziomie jej organizacji

Zarówno z fizycznego jak i inżynierskiego punktu widzenia nie wystarczy jednak wiedzieć jak materiał reaguje na bodziec, gdyż interesuje nas przede wszystkim wielkość tej reakcji. Musimy np mieć możliwość obliczenia, w jakim stopniu projektowany przez nas element konstrukcji zmieni sprężystość swoje wymiary gdy zostanie poddany założonym obciążeniom, lub też określić dokładnie, czy dielektryczna płytka podłożowa nowej 1024 kilobajtowej kości pamięci mikrokomputera będzie miała dostateczną przewodność cieplną, aby odprowadzić z tego urządzenia nanowaty energii wydzielane z każdego bajta w czasie sekundy pracy. Wiemy, że pręt aluminiowy odkształci się sprężysto pod wpływem jednakowej siły trzy razy mocniej, niż taki sam wymiarowo pręt stalowy, albo, że dielektryczny tlenek berylu przewodzi ciepło blisko dziesięć razy intensywniej niż tlenek glinu⁵³. Ale taka informacja nie wystarcza do naszych obliczeń. Aby właściwości materiałowe mogły zostać zmierzone, porównane i wykorzystane, należy je wyrazić w liczbach odnoszących się bezpośrednio do materiału. Muszą więc być określane w taki sposób, aby nie zależały od kształtów i wymiarów ciała oraz od zastosowanej metody ich badania. Jest to konieczne nie tylko dla zapewnienia obiektywności przy charakteryzowaniu i porównywaniu materiałów, ale również dlatego, że tylko w ten sposób możemy te właściwości jednoznacznie wyodrębnić ze wszystkich innych czynników determinujących materiał, układ czy konstrukcję, co pozwala nam na swobodne posługiwanie się nimi podczas projektowania.

Łatwo zauważyć, że w podanych przykładach właściwości występują jako czynnik ilościowy określający związek między bodźcem i reakcją. W pierwszym przykładzie odniesioną do materiału właściwością jest współczynnik sprężystości μ (moduł Younga) którego odwrotność wiąże ilościowo naprężenie σ z powstającym pod jego działaniem odkształceniem sprężystym ϵ_{spr}

$$\epsilon_{spr} = \mu^{-1} \times \sigma \quad 1.$$

⁵³ mimo to nie wykorzystujemy go powszechnie, gdyż jest niezwykle toksyczny. Materiałem podłożowym przyszłości wydaje się być diament, który będąc izolatorem posiada najwyższą przewodność cieplną spośród wszystkich znanych materiałów.

w drugim natomiast jest nią przewodność cieplna χ uzależniająca ilościowo gradient temperatury ΔT z wynikającym z jego istnienia przepływem ciepła przez materiał:

$$\Delta Q = \chi \Delta T \quad 2.$$

Można więc określić właściwość materiałową jako stałą, zależną wyłącznie od natury materiału i nie związaną z jego wymiarami, która ilościowo wiąże reakcję danego materiału z przyłożonym bodźcem i wyrażona jest zwykle przez liniowy związek pomiędzy mierzalnymi wielkościami o postaci ogólnej:

$$\text{Reakcja} = \text{Właściwość Materiałowa} \times \text{Bodziec} \quad 3.$$

Związek ten, prawdziwy dla większości przypadków, gdy bodźce są dostatecznie małe, określa równocześnie metodę, za pomocą której właściwość może zostać pomierzona.

Właściwości materiałowe często są zdefiniowane na podstawie praw fizyki. W podanych przykładach równanie (1) stanowi zapis prawa Hook'a, a równanie (2) zapis prawa Fouriera. Podobnie przewodnictwo elektryczne definiujemy za pomocą prawa Ohma, uzależniającego gęstość prądu od natężenia pola elektrycznego, natomiast masę wyrażamy zgodnie z drugim prawem Newtona, wiążącym siłę i przyspieszenie itd.

Pewne wielkości wykorzystywane do określania właściwości są bezkierunkowe. Należą do nich np masa i objętość materiału, które mierzymy w celu wyznaczenia jego gęstości, dlatego też gęstość ma również charakter bezkierunkowy, czyli **skalarny** i określa się ją pojedynczą liczbą, nie związaną z żadnym układem odniesienia. Inne wielkości, jak np siła, mogą zostać zdefiniowane jedynie pod warunkiem uwzględnienia ich kierunku, a więc są **wektorami** i w celu ich określenia należy podać zarówno wielkość (moduł wektora) jak i kierunek w odpowiednim układzie współrzędnych, co wymaga podania trzech liczb (trzech składowych). Sytuacja znacznie się komplikuje gdy właściwości ciała są anizotropowe, to znaczy, gdy zależą od kierunku badania, co jest cechą charakterystyczną ciał krystalicznych. Przedstawimy to nieco dokładniej na przykładzie przewodności elektrycznej. Jeżeli pole elektryczne opiszemy wielkością wektorową \mathbf{E} , to wytworzona reakcja będzie wielkością wektorową \mathbf{j} charakteryzującą gęstość prądu. W przypadku gdy leżący wzdłuż osi x przewodnik jest izotropowy (badana właściwość nie zależy od kierunku badania), a pole zostanie przyłożone do niego równoległe, to wektor \mathbf{j} będzie równoległy i proporcjonalny do wektora \mathbf{E} , a składowe nierównoległe do osi przewodnika ulegną wyzerowaniu. Wtedy związek między bodźcem i reakcją można zapisać wykorzystując prawo Ohma:

$$j_x = \rho E_x \quad 4.$$

przy czym współczynnik proporcjonalności ρ jest równy przewodności elektrycznej. Jeżeli jednak będziemy badali przewodnik anizotropowy, to współczynnik proporcjonalności stanie się zależny od kierunku, a do jego opisania potrzebnych będzie aż dziewięć składowych. O takich właściwościach mówimy, iż są wielkościami **tensorowymi**. Jak się okazuje większość właściwości ciał krystalicznych ma charakter tensorowy, więc dla ich zrozumienia musimy umieć posługiwać się *Rachunkiem Tensorowym*, któremu poświęcamy istotną część wykładów z *Matematyki*.

Właściwości materiału klasyfikuje się zwykle według natury działających bodźców i odpowiadających im reakcji. Wyróżniamy w ten sposób właściwości mechaniczne (mechaniczny bodziec i mechaniczna reakcja) i podobnie właściwości cieplne, elektryczne, magnetyczne, chemiczne, optyczne itd. Ma to swoje uzasadnienie w funkcjach materiału oraz w specyfice stosowanych metod badawczych. Na przykład właściwości mechaniczne interesują nas głównie w przypadku materiałów konstrukcyjnych, których zadaniem jest przenoszenie obciążeń, podczas gdy pozostałe właściwości będą miały wtedy znaczenie wtórne, natomiast w przypadku szkła

światłowodowego pierwotnymi dla nas będą właściwości optyczne, chociaż budując kabel światłowodowy musimy pamiętać również i o jego wytrzymałości.

Niezwykle interesująca i mająca coraz większe znaczenie grupa właściwości materiałowych wiąże ze sobą bodźce i reakcje należące do różnych typów: np właściwości piezoelektryczne ujawniają się, gdy materiał poddany działaniu siły mechanicznej reaguje elektrycznie wytwarzając pole elektryczne (zjawisko to wykorzystujemy np w zapalniczkach do generowania iskry), a właściwości elektrooptyczne powodują, że materiał poddany działaniu bodźca elektrycznego reaguje emitując fotony (na tej zasadzie działają diody świecące i lasery półprzewodnikowe⁵⁴). Niektóre właściwości tego typu przedstawiono w tablicy 2.

Z punktu widzenia inżynierii materiałowej podział właściwości według bodźców jest zwykle mało przydatny. Nie pokazuje on bowiem zależności właściwości od tego szczebla hierarchii struktury, na którym są one generowane, a więc nie ujawnia możliwości sterowania nimi. W tym celu wygodnym jest przyjęcie podziału właściwości w zależności od tego czy zależą one od budowy fazowej czy też od mikrostruktury (Tablica 3). Należy podkreślić, że podział ten nie ma charakteru dosłownego, ponieważ mikrostruktura w pewnym stopniu wpływa na wszystkie właściwości, jednak w przypadku właściwości zależnych od budowy fazowej wpływ ten jest stosunkowo niewielki, a czasami pomijalnie mały. Jako przykład można podać gęstość, będącą jednym z głównych zależnych od budowy fazowej parametrów charakteryzujących materiał: możemy ją obliczyć znając ciężar atomowy pierwiastka oraz wymiary komórki elementarnej sieci krystalicznej. Subtelne pomiary gęstości pokazują jednak, że maleje ona o kilka dziesiątych procenta w wyniku odkształcenia plastycznego. Jest to efekt niezgodny z potoczną świadomością: zgniatając materiał powodujemy wzrost jego objętości! Dzieje się tak dlatego że, jak już wspomnieliśmy, odkształcenie plastyczne zachodzi poprzez generację i ruch defektów budowy fazowej. W bezpośrednim otoczeniu defektów upakowanie atomów jest gorsze niż w sieci idealnej. Tak więc wzrost długości linii dyslokacyjnych przypadających na jednostkę objętości materiału powoduje zmniejszenie jego gęstości.

Należy też wspomnieć, że istnieją właściwości, które mają charakter kolektywny, to znaczy są przejawem łącznego ujawnienia się kilku innych właściwości. Zwykle nie można ich określić w postaci liczbowej czy też uniezależnionej od zastosowanej techniki pomiarowej, dlatego w pierwszym przypadku nazywamy je cechami materiału (np spawalność, lub zgodność biologiczna z organizmem) a w drugim - właściwościami technologicznymi (np twardość). Wreszcie są pewne właściwości, które nie wynikają bezpośrednio ze związku między bodźcem a reakcją. Należą do nich np właściwości ekonomiczne, z których najbardziej syntetyczny charakter ma cena.

TABLICA 2

BODŹCE:	WŁAŚCIWOŚCI ZALEŻNE OD:	
	BUDOWY FAZOWEJ	MIKROSTRUKTURY
CHEMICZNE	potencjał elektrochemiczny	korozja międzykrystaliczna, samodyfuzja

⁵⁴w tych urządzeniach właściwości elektrooptyczne są generowane na złączach a nie w litym materiale.

CIEPLNE	temperatura topnienia przewodność rozszerzalność ciepło właściwe	
ELEKTRYCZNE	oporność metali WT potencjał termoelektryczny	oporność metali NT oporność półprzewodników
MAGNETYCZNE	nasycenie magnetyczne podatność magnetyczna	ferromagnetyzm magnetostrykcja
MECHANICZNE	ciężar właściwy moduł sprężystości	wytrzymałość plastyczność
OPTYCZNE	barwa	przezroczystość

WT - wysokie temperatury, NT - niskie temperatury

8.1. Właściwości zależne od budowy fazowej

Właściwości zależne od budowy fazowej zdeterminowane są przede wszystkim oddziaływaniami elektronowymi, właściwymi dla danego składu chemicznego oraz sposobu ułożenia atomów w przestrzeni, natomiast słabo zależą od niedoskonałości tego ułożenia, czyli od mikrostruktury. Stanowią one charakterystyczną cechę danej fazy. Wyróżnić możemy dwa ich typy:

1. Właściwości wynikające z mechanicznej stabilności ciała stałego. Decydują o nich siły oddziaływania międzyatomowego oraz sposób uporządkowania atomów (należą do nich np.: gęstość, moduły sprężystości, kohezja, temperatura topnienia, rozszerzalność cieplna, ciepło właściwe, potencjał elektrochemiczny, właściwości paramagnetyczne, diamagnetyczne i optyczne).
2. Właściwości wynikające ze statystycznej stabilności ciała stałego. Pochodzą one od zjawisk transportu cząstek (elektronów, fononów, atomów, itp) zachodzących pod wpływem sił wywołanych istnieniem gradientów wielkości elektrycznych, cieplnych czy chemicznych (należą do nich np.: przewodność cieplna i elektryczna, termoelektryczność, dyfuzyjność itp.).

Warto wspomnieć, że niektórymi z nich interesujemy się dlatego że charakteryzują one materiał z punktu widzenia jego użyteczności, inne natomiast, aczkolwiek mało istotne w zastosowaniach inżynierskich są cenne, lub niezastąpione w badaniach naukowych, gdyż ich pomiar pozwala śledzić procesy zachodzące w materiale. Jako przykład można przytoczyć wspomniany przypadek zmian gęstości materiału zachodzący pod wpływem odkształcenia plastycznego. Zmiany te są one na tyle małe, że nie mają inżynierskiego znaczenia, ale równocześnie na tyle duże, że możemy je zmierzyć i na tej podstawie uzyskać informacje o skutkach przekształceń mikrostruktury wywołanych odkształceniem.

8.1.1. Mechaniczna stabilność ciała stałego

Charakterystyczną cechą faz stałych jest ich stabilność mechaniczna, a więc stałość kształtów i wymiarów, różniącą ciała stałe od cieczy i gazów. Jest ona bezpośrednim skutkiem występowania omówionych w rozdz. 6.1 sił wzajemnego odpychania i przyciągania między atomami. Siły te zmieniają się z odległością międzyatomową w niejednakowy sposób (siły odpychające mają bliższy zasięg), co można zapisać zależnością typu:

$$F(a) = Aa^{-n} - Ba^{-m} \quad 5.$$

gdzie pierwszy człon charakteryzuje siły przyciągające a drugi odpychające, przy czym $m > n$ (Rys. 23). Wynika stąd, że istnieje pewna odległość międzyatomowa a_0 , przy której następuje zrównoważenie sił. Gdy atomy znajdują się wobec siebie w takiej właśnie odległości to ich energia potencjalna osiągnie najniższy poziom a położenie będzie miało charakter równowagowy (Rys.23). Prowadzi to do utrzymywania uporządkowanego, skoordynowanego układu atomów. Energia wiązania międzyatomowego jest równa pracy mechanicznej którą należy wykonać przeciwko sile przyciągającej przenosząc atom z położenia a_0 do nieskończoności a więc możemy ją obliczyć całkując równanie (1)

Należy zwrócić uwagę, że dla równowagowej odległości a_0 , przy której $F = dE/da = 0$

występuje minimum energii, ponieważ gdyby chciało się zmienić położenie atomów, należałoby dostarczyć energię. Wiąże się to z istnieniem studni energetycznej (Rys 22).

Zależność energii wiązania od przemieszczenia atomów u z położenia równowagowego zdefiniowanego jako

$$u = a - a_0 \quad 6.$$

określa funkcja potencjału $\Phi(u)$ będąca cechą charakterystyczną materiału i decydująca o wielu jego podstawowych właściwościach.

Rozpatrzmy przypadek dwóch wyizolowanych z ciała stałego atomów, oddalonych o odległość a , poddanych działaniu bodźca w postaci dwóch wzajemnie zrównoważonych sił F . Gdy $F = 0$ to $a = a_0$ i występuje równowaga ($u=0$).

Siła wiązania stanowi funkcję przemieszczenia:

$$F = \frac{d\Phi(u)}{du} \quad 7.$$

a wytworzone wiązanie jest odwracalne w tym sensie, że gdy odległość między atomami powróci do położenia równowagowego a_0 , to siła wiązania powróci do swojej wartości

określonej funkcją $\Phi(u)$. Zachowanie takie jest cechą charakterystyczną sprężystości.

Podstawowe prawo teorii sprężystości mówi, że przy dostatecznie niewielkich odkształceniach ich wartość jest proporcjonalna do siły. Jest to znane nam prawo Hooke'a. Wyprowadzić je można z trzech przesłanek:

1. funkcja $\Phi(u)$ jest ciągła względem u
2. minimum funkcji $d\Phi(u)/du = 0$ występuje dla $u = 0$ (dla $a = a_0$)
3. przemieszczenie u jest małe względem a_0 ($u \ll a_0$)

Na podstawie pierwszej przesłanki możemy funkcję potencjału przedstawić w postaci szeregu Taylora:

$$\Phi(u) = \Phi_0 + \left(\frac{d\Phi}{du}\right)_0 u + \frac{1}{2} \left(\frac{d^2\Phi}{du^2}\right)_0 u^2 + \dots \quad 8.$$

przyczym Φ_0 jest energią dla $u = 0$, a wszystkie współczynniki różniczkowe są określone również dla $u = 0$.

Z przesłanki drugiej wynika, iż możemy pominąć drugi wyraz szeregu.

Z przesłanki trzeciej wynika natomiast, że wszystkie wyrazy szeregu większe od trzeciego mogą zostać pominięte (gdyż zawierają rosnące potęgi bardzo małej wartości u).

Otrzymujemy więc

$$\Phi(u) = \Phi_0 + \frac{1}{2} \left(\frac{d^2\Phi}{du^2}\right)_0 u^2 \quad 9.$$

a wyrażając względem siły (3)

$$F = \left(\frac{d^2\Phi}{du^2}\right)_0 u \quad 10.$$

Ponieważ człon w nawiasach jest krzywizną funkcji $\Phi(u)$ w minimum ($u = 0$), to stanowi on niezależną od przemieszczenia stałą. Można więc napisać:

$$F = \text{const} \times u \quad 11.$$

Gdyby wyrażenie to przedstawić nie względem siły F i przemieszczenia u , ale względem naprężenia σ i odkształcenia ϵ (a więc gdy uniezależnimy je od wymiarów ciała) to stała stanie się właściwością materiałową, nazywaną modułem sprężystości, czyli modułem Younga μ , a równanie przekształci się w prawo Hooke'a (Równ. 1). Wartość stałej nie zależy od tego czy atomy odciągamy od siebie, czy dociskamy.

Przeprowadzone rozumowanie, niezależnie od dokonanych uproszczeń wskazuje na bezpośredni związek występujący pomiędzy energią wiązania międzyatomowego a właściwościami sprężystymi ciała (por. Tablica.2). Z rozważań nad naturą wiązań można wysnuć ogólne jakościowe wnioski również odnośnie niektórych innych ważnych właściwości, które są zdeterminowane budową fazową.

Do tej pory przyjmowaliśmy, że atomy są nieruchome, zajmując stabilnie położenia o najmniejszej energii, co w przypadku równowagowym odpowiada dnu studni energetycznej. Średnia energia cieplna atomu (energia potencjalna plus energia kinetyczna) w ciele stałym wynosi $3kT$, gdzie k jest stałą Boltzmanna. Ponieważ wzrost temperatury powyżej zera bezwzględnego podnosi energię atomów, więc w momencie gdy stanie się ona większa od energii wiązania nastąpi oddzielenie atomów od siebie i zmiana stanu skupienia⁵⁵. Oczywiście temperatura topnienia będzie tym wyższa im głębsza jest studnia, a więc w przypadku materiałów o znacznej energii wiązania i wynikającym stąd dużym module sprężystości studnia energetyczna jest głęboka. Z tego wynika, że zarówno moduł sprężystości jak i temperatura topnienia zależą od energii

⁵⁵dlatego energię wiązania możemy wyznaczyć doświadczalnie z pomiarów ciepła sublimacji

wiązania w ten sam sposób, a więc między tymi dwiema właściwościami, dla materiałów o podobnej liczbie koordynacyjnej, wystąpić powinna liniowa zależność, co rzeczywiście ma miejsce. Dlatego materiały o wysokiej temperaturze topnienia są twardsze (np diament, Al_2O_3) niż te które mają niską temperaturę topnienia (ołów, polimery etc).

Wyjątek od tej reguły pojawia się, gdy w ciele stałym występuje więcej niż jeden rodzaj wiązań atomowych (np grafit).

Wzrost energii atomów z temperaturą związany jest z ich drganiami cieplnymi względem swoich średnich położzeń. Można wykazać, że częstość tych drgań jest proporcjonalna do pierwiastka z ilorazu μ/m , gdzie μ jest modułem sprężystości a m masą atomową.

Daje to wartości rzędu 10^{13} Hz. Amplituda drgań jest natomiast proporcjonalna do pierwiastka z ilorazu kT/μ , co w temperaturach pokojowych stanowi kilka procent równowagowej odległości międzyatomowej. Tak więc przyrost amplitudy drgań ze wzrostem temperatury w materiałach, które odznaczają się silnymi wiązaniami, a więc dużym modułem sprężystości, jest słabszy niż w materiałach o małym module, gdyż ściany studni energetycznej w materiałach silnie wiązanych będą bardziej strome. Wzrost temperatury spowoduje w nich mniejszy średni przyrost odstępów między atomami czyli materiał z nich zbudowany będzie się odznaczał małym współczynnikiem rozszerzalności cieplnej.

8.1.2. Statystyczna stabilność ciała stałego

Jak wspomniano, wiele właściwości materiału zależy od zjawisk transportu, a więc od zdolności do przemieszczania się cząstek (elektronów, fononów, atomów, itp) względem ich otoczenia w obrębie faz. Aby transport zachodził potrzebne jest istnienie gradientów wywołanych np lokalnymi odchyleniami od warunków równowagi. I tak np transport elektronów, zachodzący pod wpływem istnienia pól elektrycznych i gradientów temperatury ujawnia takie właściwości jak przewodność cieplna i elektryczna oraz właściwości termoelektryczne. Z punktu widzenia przekształceń mikrostruktury oraz oddziaływania między jej elementami szczególnie znaczenie mają zjawiska związane z transportem atomów w polu potencjału chemicznego, które noszą nazwę dyfuzji.

Zjawiska dyfuzji są konsekwencją statystycznej stabilności ciała stałego, czyli dążności ruchliwych cząstek do zajmowania najbardziej statystycznie prawdopodobnych, a więc odznaczających się najniższą energią położzeń, w wyniku czego zachodzi przemieszczanie się atomów od stanów uporządkowanych do stanów o wyższym stopniu nieuporządkowania (chaosu)⁵⁶. Jeżeli więc w obrębie fazy występuje nierównomiernie rozmieszczenie jej składników to pojawi się tendencja do wyrównania ich koncentracji .

Bodźcem wymuszającym ukierunkowanie procesu dyfuzji jest istnienie gradientu koncentracji składu chemicznego dC/dx , wyrażonego w atomach na jednostkę objętości na jednostkę długości, natomiast reakcję stanowi strumień dyfundujących atomów J wyrażający ile atomów przeskakuje przez jednostkę powierzchni w jednostce czasu. Wiążąc bodziec z reakcją zgodnie z konwencją przedstawioną zależnością (3) możemy równanie transportu atomów zapisać w postaci:

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad 12.$$

nazywanej pierwszym prawem Ficka⁵⁷. A więc właściwością materiałową charakteryzującą podatność atomów do wędrówki w kryształach pod wpływem gradientu składu chemicznego jest współczynnik proporcjonalności D mający wymiar m^2/sek . Znak minus we wzorze (12) odzwierciedla fakt, że transport masy zachodzi w kierunku

⁵⁶wiąże się to z wynikającą z drugiej zasady termodynamiki dążnością układu do wzrostu entropii

⁵⁷istnieje również drugie prawo Ficka przedstawiające zmianę koncentracji w funkcji czasu,

od wyższych do niższych koncentracji. Właściwość D nazywamy dyfuzyjnością. Zależy ona od sił, którymi atom jest wiązany w swoim położeniu; im są one większe tym dyfuzyjność będzie mniejsza. Ze względu na bezpośredni związek z fluktuacjami drgań cieplnych atomów wykazuje ona również bardzo silną zależność od temperatury. Wzrost temperatury powoduje bowiem, że zgodnie z zasadami statystyki boltzmannowskiej udział atomów n , które mają energię drgań cieplnych większą niż pewna wartość E wynosi w danej temperaturze

$$\frac{n}{N} \approx e^{-E/kT} \quad 13.$$

gdzie N - ogólna ilość atomów.

Dzięki temu, wraz ze wzrostem temperatury rośnie nie tylko liczba atomów, które mają dostatecznie wysoką energię aby przeskoczyć w inne położenie, ale również rośnie liczba pustych, nie obsadzonych przez atomy miejsc sieciowych, czyli wakansów, co dodatkowo sprzyja transportowi masy. Możemy więc napisać, że

$$D = D_0 e^{-E/kT} \quad 14.$$

TABLICA 4 Właściwości dyfuzyjne podstawowych grup materiałów

klasa materiałów	D_0 m ² s ⁻¹	E/RT_{top}
metale RPC	$1,6 \times 10^{-4}$	17,8
metale RSC	5×10^{-5}	18,4
metale HZ	5×10^{-5}	17,3
ceramika tlenkowa	$3,8 \times 10^{-4}$	23,4

gdzie D_0 jest stałą niezależną od temperatury i zależną od sposobu upakowania atomów w przestrzeni, natomiast E jest zależną od energii wiązań (i z tej przyczyny wprost proporcjonalną do temperatury topnienia) energią (nazywaną energią aktywacji), którą należy dostarczyć, aby nastąpił przeskoczenie atomu w nowe położenie. Atomy wędrują w sieci krystalicznej nawet w przypadku bardzo czystych ciał stałych. Proces taki nazywamy samodyfuzją⁵⁸. Duże znaczenie praktyczne ma to, że w obszarze tej samej fazy szybkość przenoszenia masy wzdłuż defektów sieci krystalicznej takich jak dyslokacje czy powierzchnie międzykrystaliczne jest znacznie większa niż w objętości doskonałej sieci, co wynika z tego, że upakowanie atomów jest w bezpośredniej bliskości tych defektów nieco mniejsze. W Tablicy 4 zestawiono typowe dane dyfuzyjne dla samodyfuzji objętościowej kilku grup materiałów krystalicznych. Dyfuzja jest podstawowym mechanizmem, poprzez który zachodzą przemiany fazowe oraz związane z nimi przekształcenia mikrostruktury. Przemiana może zajść dlatego właśnie, że atomy składników mają możliwość przemieszczania się z mniej prawdopodobnych położzeń w obrębie jednej fazy do bardziej prawdopodobnych położzeń fazy drugiej. Ponieważ dyfuzja wpływa również na oddziaływania między elementami mikrostruktury w wyniku tego

⁵⁸zjawisko samodyfuzji możemy badać stosując np atomy znaczone

większość właściwości zależnych od mikrostruktury, o których będzie mowa w następnym paragrafie jest silnie zależna od temperatury. Zjawisko dyfuzji wywiera też zasadniczy wpływ na przebieg wszystkich procesów technologicznych związanych z syntezą i przetwarzaniem materiałów.

8.2. Właściwości zależne od mikrostruktury

Właściwości zależne od mikrostruktury generowane są dzięki temu, że pod wpływem przyłożonych bodźców uruchamiane zostają oddziaływania, w których biorą udział jej elementy, a więc wakanse, dyslokacje, granice międzykrystaliczne, wydzielania innej fazy itp. Te wzajemne oddziaływania elementów mikrostruktury wpływają determinująco na reakcję materiału. Do najważniejszych w tej grupie należą właściwości mechaniczne, ujawniające się gdy materiał zostaje poddany działaniom siły. Odnoszą się one do tak podstawowych cech materiałów jak wytrzymałość, plastyczność, kruchość, twardość⁵⁹. Elementy mikrostruktury oddziałują między sobą dzięki istnieniu sił sprężystych i dyfuzyjnych. Intensywność tego oddziaływania zależy więc nie tylko od wielkości przyłożonej siły ale również pośrednio i od budowy fazowej poprzez charakterystyczne dla niej właściwości którymi są moduł sprężystości i dyfuzyjność. Gdy temperatury są niskie, wpływ procesów dyfuzyjnych na oddziaływanie elementów mikrostruktury a tym samym na zachowanie mechaniczne materiału jest pomijalnie mały. Jednak gdy temperatura przekracza 0,3-0,4 temperatury topnienia danego materiału (w skali bezwzględnej)⁶⁰ intensywność zależnych od dyfuzji zjawisk zaczyna odgrywać dominującą rolę. Dlatego też materiały przeznaczone do pracy w tzw. wysokich temperaturach, tj. wyższych niż 0,4 T_{top} muszą charakteryzować się inną budową fazową i inną mikrostrukturą niż te, które są przeznaczone do pracy w temperaturach niższych.

Właściwości mechaniczne, jak wspomniano, ujawniają się gdy materiał zostaje poddany bodźcowi w postaci siły i reaguje na ten bodziec ulegając odkształceniu. Aby zgodnie z podanymi zasadami uniezależnić się od kształtów i wymiarów ciała, bodziec wyrażamy zwykle jako naprężenie σ będące miarą prostopadłej siły działającej na jednostkę powierzchni,

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad 15.$$

ma więc ono wymiar N/m^2 czyli pascal. Jest to mała jednostka, dlatego poziom naprężeń z którym spotykamy się w inżynierskich zastosowaniach jest zwykle wyrażany w MPa (w megapascalach). Natomiast odkształcenie ε stanowiące reakcję materiału na przyłożone naprężenie, wyrażane jest jako ułamek:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad 16.$$

gdzie ΔL jest zmianą wymiaru ciała, a L_0 jego wymiarem początkowym, lub wielkością procentową o którą zmienił się początkowy wymiar ciała, czyli

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} 100\% \quad 17.$$

⁵⁹do właściwości zależnych od mikrostruktury należy również przewodność w półprzewodnikach, przewodność metali w niskich temperaturach, ferromagnetyzm i magnetostrykcja

⁶⁰a więc gdy temperatury homologiczne przekraczają 0,3-0,4

Gdy naprężenie jest niewielkie, przestrzenny układ atomów ulega pewnemu zniekształceniu, jednak atomy nie zmieniają swoich sąsiadów, w wyniku czego odkształcenie ma wtedy charakter odwracalny, sprężysty, ustępując po zdjęciu bodźca, a związek pomiędzy bodźcem i reakcją opisuje prawo Hooke'a (równ. 1). Wzrost naprężenia powyżej pewnej, charakterystycznej dla danego ciała wartości, która w większości ciał stałych zostaje osiągnięta, gdy odkształcenie wynosi około dziesiątej części procenta, powoduje, że w układzie atomów zachodzą nieodwracalne zmiany. Charakter tych zmian zależy w głównej mierze od podatności danej fazy na jej zdefektowanie czyli od łatwości, z którą mogą zostać utworzone w niej nowe dyslokacje. Jeżeli sieć krystaliczna wykazuje dużą odporność na zdefektowanie, to znaczy, gdy naprężenie niezbędne dla utworzenia i ruchu dyslokacji jest większe niż siły kohezji, jak to ma miejsce np. w kryształach jonowych czy kowalencyjnych, to poddanie się budowy fazowej działaniu siły może nastąpić wyłącznie poprzez zerwanie więzi międzyatomowych, co prowadzi do pęknięcia materiału. Jeżeli jednak odporność ta jest mała, jak w przypadku metali, to ruch dyslokacji doprowadzi do zainicjowania procesu przemieszczania się atomów względem siebie, na drodze płaskich przesunięć (poślizgu) a w wyniku tego do trwałego odkształcenia plastycznego.

Informacje o tym, w jaki sposób materiał reaguje na obciążenie otrzymujemy z tzw. próby rozciągania (rys), w której próbkę, zwykle walcową, poddajemy działaniu osiowej siły, równocześnie precyzyjnie rejestrując wywołane tym obciążeniem odkształcenie. Początkowo podczas obciążania próbka zachowuje się sprężysto, a w związku z tym, zgodnie z prawem Hooke'a zależność między odkształceniem a naprężeniem jest liniowa (pochylenie prostej jest równe modułowi sprężystości). Określenie momentu, w którym zostaje zainicjowane odkształcenie plastyczne jest jednak dosyć trudne, gdyż zależy od czułości zastosowanej aparatury pomiarowej; czy można bowiem uznać za odkształcenie plastyczne trwałą zmianę wymiarów ciała wywołaną przemieszczeniem zaledwie kilku warstw atomowych? Niewątpliwie tak, ale nie ma ona znaczenia praktycznego. Tak więc określenie naprężenia uplastyczniającego pozostaje kwestią umowy. Zwykle przyjmuje się, że takie naprężenie, nazywane umowną granicą plastyczności odpowiada odkształceniu trwałemu wynoszącemu 0,2%. Umowna granica plastyczności jest podstawową właściwością charakteryzującą materiał w zastosowaniach konstrukcyjnych. Oznacza ona bowiem naprężenie, które w wykonanym z danego materiału elemencie nie może zostać przekroczone bez narażenia go na makroskopowe, trwałe odkształcenie.

Z przebiegu krzywej rozciągania wynika, że dla dokonania przyrostu odkształcenia powyżej granicy plastyczności konieczny jest przyrost naprężenia. Jeżeli obciążoną powyżej granicy plastyczności próbkę odciążymy i następnie ponownie poddamy obciążeniu to zauważymy, że wykaże ona wyższą niż poprzednio granicę plastyczności, czyli, że metal w miarę odkształcenia plastycznego zostaje umocniony. Jest to niezwykle ważna cecha, dzięki której metal obciążony stałym naprężeniem większym od granicy plastyczności reaguje natychmiast pewnym odkształceniem plastycznym, jednak utrzymywanie tego naprężenia nie powoduje dalszego odkształcania. Zachowanie to odróżnia ciała plastyczne od ciał lepkich, jak np. plastelina (lub guma do żucia), które pod wpływem stałego obciążenia będą z upływem czasu ulegały wydłużaniu aż do zerwania. Jednak gdy temperatura będzie wysoka, a więc gdy oddziaływania elementów mikrostruktury zaczynają zależeć od procesów dyfuzyjnych to również i ciała plastyczne poddane stałemu naprężeniu wykazują zależność odkształcenia od czasu trwania obciążenia. Zjawisko to nazywamy pełzaniem. Ma ono duże znaczenie, gdyż ogranicza możliwość stosowania metali w konstrukcjach pracujących w wysokich temperaturach.

Na Rysunku 24 widzimy, że wykres naprężenia rozciągającego wyrażony względem początkowego przekroju próbki (tzw. naprężenia nominalnego) wykazuje przegięcie: po osiągnięciu maksimum naprężenie zaczyna spadać, aż następuje zerwanie. Dzieje się tak dlatego, że ze względu na konieczność zachowania objętości wydłużana próbka zmniejsza swój przekrój poprzeczny, czyli ulega przewężeniu. W ciałach plastycznych,

którymi są metale, przewężanie to jednak nie zachodzi równomiernie: dosyć szybko następuje lokalizacja odkształcenia i na próbce powstaje tzw. szyjka. Z tego powodu, aby określić naprężenia rzeczywiście istniejące w próbce podczas próby rozciągania musimy pomierzoną siłę odnosić nie do przekroju początkowego próbki, ale do jej najmniejszego przekroju rzeczywistego (Rys. 25). Największe naprężenie nominalne, a więc odniesione do przekroju początkowego, które próbka może przenieść nazywamy wytrzymałością na rozciąganie. Jego wielkość zależy więc od dwóch czynników: od podatności materiału do tworzenia szyjki oraz od pewnego krytycznego naprężenia rzeczywistego przyczyniającego się do zapoczątkowania pęknięcia materiału, które z kolei zależy od wielkości sił oddziaływania międzycząsteczkowego.

Z próby rozciągania możemy również określić podatność materiału do odkształcenia plastycznego, którą nazywamy ciągliwością. Jest to stopień odkształcenia plastycznego w chwili pęknięcia. Stopień ten możemy wyrazić jako procentowy przyrost długości próbki w chwili zerwania (wydłużenie), względnie jako procentową redukcję przekroju w miejscu pęknięcia (przewężenie). Ponieważ, jak wspomnieliśmy, odkształcanie plastyczne rozciąganej próbki zachodzi niejednorodnie, gdyż tworzy się na niej szyjka, więc pomiędzy wydłużeniem próbki a jej przewężeniem nie ma matematycznie wyrażalnego związku, mimo że charakteryzują one tą samą cechę materiału.

Pole pod krzywą umacniania (przedstawioną we współrzędnych σ - ϵ) posiada wymiar energii na jednostkę objętości i jest równe energii absorbowanej w chwili pęknięcia, czyli energii potrzebnej do zniszczenia materiału. Tę istotną cechę charakteryzującą podatność materiału do pęknięcia nazywamy wiązkością. Każdy, kto kiedykolwiek stłukł szybę wie jednak, że to czy ona pęknie zależy nie tylko od wielkości przyłożonej siły, ale i od tego czy obciążenie zostało przyłożone powoli (statycznie) czy też uderowo (dynamicznie). Chcąc więc określić odporność materiału na pęknięcie powinniśmy sprawdzić w jaki sposób zachowuje się on podczas obciążania dynamicznego, dokonywanego np. za pomocą specjalnych młotów pozwalających na pomiar energii zużytej na złamanie próbki. Tę cechę materiału nazywamy udatnością.

Wszystkie te właściwości pojawiają się dzięki temu, że pod wpływem przyłożonych bodźców elementy mikrostruktury mogą być generowane i anihilowane, mogą ze sobą oddziaływać poprzez wzajemne przyciąganie, odpychanie i blokowanie, oraz mogą się poruszać. Ponieważ skład mikro-struktury, a więc gęstość i rozmieszczenie jej elementów bardzo silnie zależy od zabiegów technologicznych przeprowadzonych na materiale, to właściwości zależne od mikrostruktury charakteryzują materiał tylko w określonym jego stanie, zaś między próbkami o tej samej budowie fazowej ale innej historii (a więc innej mikrostrukturze) mogą występować znaczne różnice właściwości.

Jak wykazano wcześniej, wzrost odkształcenia powoduje wzrost umownej granicy plastyczności. Wynika on stąd, że odkształcanie plastyczne prowadzi do wzrostu liczby dyslokacji wyrażanej długością linii dyslokacji w jednostce objętości materiału (czyli gęstością dyslokacji ρ), przy czym

$$\epsilon \propto b\rho\bar{x} \quad 18.$$

gdzie b jest wielkością odkształcenia wywołanego przez jedną dyslokację (jest ono rzędu odstępów międzycząsteczkowych), a \bar{x} jest średnią odległością, na którą dyslokacje mogą przemieszczać się w sieci krystalicznej zanim uwięzną (nie przekracza ona kilkudziesięciu mikrometrów). Ponieważ związek naprężenia z gęstością dyslokacji ma w niskich temperaturach przybliżoną postać

$$\sigma \propto \sqrt{\rho} \quad 19.$$

gdyż w miarę wzrostu gęstości dyslokacji istniejące między nimi oddziaływania wpływają na utrudnienie ruchu, więc po podstawieniu otrzymujemy

$$\sigma \propto \sqrt{\frac{1}{b\bar{x}}} \sqrt{\varepsilon} \quad 20.$$

Wynika stąd, że naprężenie potrzebne do odkształcania plastycznego jest w przybliżeniu proporcjonalne do pierwiastka odkształcenia. Jednak w wysokich temperaturach, dzięki intensyfikacji dyfuzji pojawia się możliwość wzajemnego anihilowania defektów budowy fazowej, dzięki czemu część dyslokacji generowanych podczas odkształcania natychmiast ginie i materiał przestaje się umacniać. W rezultacie naprężenie potrzebne dla odkształcania plastycznego staje się zależne nie od odkształcenia, ale od czasu, co jest istotą wspomnianego uprzednio zjawiska pełzania.

Zależnością (20) można posłużyć się również w celu oszacowania związku istniejącego pomiędzy granicą plastyczności a inną cechą mikrostruktury, którą jest jej ziarnistość. Otóż w ciałach polikrystalicznych maksymalna odległość na którą może poruszyć się dyslokacja jest ograniczona wielkością ziarna d , ponieważ granice ziarn stanowią silną przeszkodę na drodze dyslokacji. Możemy więc założyć, że $\bar{x} = d$, a wtedy, po podstawieniu do zależności (20) otrzymujemy

$$\sigma \propto d^{-\frac{1}{2}} \quad 21.$$

Wynika stąd, że granica plastyczności materiałów jest zależna od wielkości ziarna, przy czym im materiał jest bardziej drobnoziarnisty (mniejsze d) tym będzie mocniejszy (większe σ), dlatego przy wytwarzaniu mocnych materiałów stosujemy technologie zapewniające im możliwie małą wielkość ziarn. Jednak z przyczyn podobnych do tych, które wywołują zjawisko pełzania, w wysokich temperaturach zależność granicy plastyczności od wielkości ziarna ulega odwróceniu, a więc w materiałach przeznaczonych do pracy w wysokich temperaturach zależy nam na tym aby wielkość ziarna była duża.

Znajomość zależności właściwości mechanicznych od poszczególnych elementów mikrostruktury stanowi niezbędny warunek dla projektowania materiału. Ogólnie jednak rzecz biorąc, ze względu na ogromną złożoność mikrostruktury, trudno poddającą się szczegółowemu ilościowemu opisowi⁶¹ oraz z powodu wielorakości możliwych oddziaływań między elementami mikrostruktury właściwości zależne od mikrostruktury są trudne do dokładnego, ilościowego przewidywania.

⁶¹Metodą ilościowego opisu mikrostruktury zajmuje się dyscyplina zwana stereologią, która ostatnio uległa znacznemu rozwojowi dzięki zastosowaniu metod cyfrowej analizy obrazu.

9. PROJEKTOWANIE MATERIAŁÓW

9.1. Zadania inżynierii materiałowej

Z przeprowadzonych w poprzednich rozdziałach rozważań wynika, że głównymi zadaniami stawianymi przed Inżynierią Materiałową są:

1. dostosowywanie materiałów do ekonomicznego zaspokajania określonych potrzeb poprzez opracowywanie nowych lub udoskonalanie istniejących tworzyw;
2. charakteryzowanie materiałów pod względem budowy fazowej, mikrostruktury i właściwości;
3. przewidywanie i wykorzystywanie wpływu jaki wywiera na materiał technologia jego syntezy i przetwarzania;
4. przewidywanie zachowania się materiału w czasie jego pracy;
5. badanie przydatności materiałów do spełniania wymagań
6. rozwiązywanie problemów materiałowych w zaawansowanych systemach technicznych.

Chcąc zrealizować te zadania, Inżynieria Materiałowa tworzy i wykorzystuje w praktyce wiedzę odnoszącą się do związków właściwości i zachowania się materiału z jego budową wewnętrzną. Dlatego też zajmuje się badaniami struktury i składu materiałów na wszystkich jej szczeblach organizacji, dążąc do zrozumienia wszystkich zjawisk zachodzących w materiałach i zmierzania wszelkiego rodzaju właściwości. W tym celu zajmuje się również rozwijaniem teoretycznych i doświadczalnych metod badania i charakteryzowania struktury materiałów. Doświadczenie uzyskane w ciągu lat rozwoju dyscypliny doprowadziło bowiem do zrozumienia, że niezależnie od tego, czy dany materiał jest poddawany syntezie, przeróbce czy też stosowany, to jego właściwości oraz zachodzące w nim zjawiska wynikają bezpośrednio z tego jakie atomy go tworzą, w jaki sposób są one rozmieszczone w przestrzeni i jakie zmiany w ich układzie występują pod wpływem przykładanych bodźców.

Natomiast do zadań Inżynierii Materiałowej nie należy bezpośrednio technologia kształtowania z materiałów elementów konstrukcyjnych - tymi problemami zajmuje się bowiem technologia materiałów. Odstępstwo stanowią te przypadki, w których technologia te są równocześnie wykorzystywane do ostatecznego kształtowania mikrostruktury, z którymi mamy do czynienia coraz częściej (np niektóre technologie odlewania i spiekania metali lub formowania kompozytów).

Intelektualną podstawę i najistotniejszą cechę metody stosowanej przez Inżynierię Materiałową, stanowi to, że w celu zrealizowania swoich zadań posługuje się ona analizą wielostronnych wzajemnych zależności istniejących pomiędzy czterema głównymi jej aspektami (Rys. 27), a mianowicie:

1. zespołami cech charakteryzujących zachowanie się (osiągi) materiałów, dzięki którym stają się one dla nas interesującymi lub użytecznymi;

2. właściwościami określającymi miarę użyteczności materiałów w konkretnych warunkach ich stosowania
3. strukturą, rozumianą łącznie jako budowa fazowa i mikrostruktura, która determinują właściwości i osiągi materiałów
4. technologią obejmującą syntezę i przetwórstwo materiałów w wyniku których następuje uzyskanie żądanej struktury (lub struktury i kształtu)

Różni się ona tym samym zasadniczo od podejścia reprezentowanego przez składające się na nią tradycyjne dyscypliny, traktujące wymienione aspekty odrębnie, opisując jedynie proste, dwustronne zależności. To właśnie dzięki objęciu swoim zakresem tych wielostronnych powiązań Nauka o Materiałach i Inżynieria Materiałowa tworzą wspólnie koherentne pole, w którym trudno ustalić linię rozgraniczającą.

Możemy więc stwierdzić że Nauka o Materiałach i Inżynieria Materiałowa wytwarza i stosuje wiedzę odnoszącą się do składu, struktury, syntezy i przetwarzania materiałów tak, aby w sposób ekonomiczny uzyskiwały one wymagane właściwości i zastosowania, oraz aby wykazywały się żądanym zachowaniem.

Inżynieria Materiałowa jest jedną z najkosztowniejszych dyscyplin naukowych i technicznych, gdyż realizacja każdego z jej czterech podstawowych zadań związana jest ze stosowaniem bardzo kosztownych urządzeń technologicznych i wyspecjalizowanej aparatury badawczej.

9.2. Metoda inżynierii materiałowej.

Podana na wstępie naszych wykładów definicja materiału jako stałej substancji, której właściwości czynią ją użytecznymi dla ludzi przy tworzeniu bardziej złożonych produktów pracy, określa go w sposób wyróżniający z pośród innych substancji natomiast nie odnosi się do samej jego natury. Obecnie, gdy natura materiału stała się nam bardziej bliska, powinniśmy rozszerzyć tą definicję tak, aby charakteryzowała fizyczne związki odnosząc się do wymienionych w poprzednim rozdziale relacji **technologia - struktura właściwości - zachowanie**. Definicja ta powinna stanowić proste, uniwersalne narzędzie i podstawę charakterystycznej dla Inżynierii Materiałowej metody podejścia do materiałów. W tym celu należy przejść od analitycznego do syntetycznego traktowania wymienionych relacji, w sposób szczególny podkreślając rolę budowy fazowej i mikrostruktury w kształtowaniu właściwości i zachowania materiałów.

Z poprzednich rozważań wynika pewna dwoistość naszego widzenia materiału, można by ją określić jako widzenie *od zewnątrz*, poprzez jego właściwości, oraz *od wewnątrz*, poprzez jego strukturę. Rozpatrując materiał „od zewnątrz” traktujemy go jako jednorodną całość realizującą reakcję na przyłożony bodziec. Prowadzi to do poszukiwania odpowiedzi na pytanie o to, jak materiał się zachowuje pod wpływem przyłożonego bodźca, bez rozpatrywania natury tego zachowania⁶². Tego rodzaju podejście jest ważne i użyteczne przy projektowaniu konstrukcji, ale reprezentuje punkt widzenia raczej tego, kto materiał w tej konstrukcji stosuje, niż tego, kto materiał dla tej konstrukcji tworzy.

Dla inżynierii materiałowej charakterystyczny musi więc być jeszcze inny punkt widzenia, co wynika stąd, że nie tylko chcemy zrozumieć naturę materiału, ale i dostosować go do spełniania konkretnej funkcji. W tym celu musimy dążyć do wyjaśnienia, dlaczego materiał pod wpływem różnego rodzaju bodźców zachowuje się tak a nie inaczej, co wymaga z kolei zrozumienia istoty zachodzących w nim fizycznych zjawisk. W tym celu powinniśmy patrzeć na materiał *od wewnątrz*, poprzez jego strukturę, ale przez pryzmat tego co jest *od zewnątrz*, widząc go jako całość.

⁶²jest to t.zw. podejście fenomenologiczne

Aby taką złożoną analizę można było prowadzić należy więc zdefiniować materiał jako pewien system, czyli skoordynowany wewnętrznie zbiór elementów struktury, których skład oraz wzajemne oddziaływania warunkują jego właściwości, a więc intensywność reakcji systemu na bodziec. To, które elementy zbioru (czyli jaki szczebel hierarchii struktury) przyjmujemy za podstawowe zależy od rodzaju rozpatrywanej właściwości. W przypadku większości interesujących nas właściwości, jak już wspomnieliśmy, decydującymi szczeblami struktury są budowa fazowa i mikrostruktura. A więc składnikami systemu będą elementy mikrostruktury, których wzajemne oddziaływanie będzie uzależnione od rodzaju budowy fazowej. To czy dany obiekt fizyczny przynależy do zbioru elementów systemu wynika z jego oddziaływania z wszystkimi pozostałymi elementami. Jeżeli obiekt ów takiego oddziaływania nie wykazuje, nie jest elementem struktury na danym szczeblu jej hierarchii. Wynika stąd, że strukturę tworzą nie tylko jej elementy, ale i ogół występujących między nimi oddziaływań.

Materiał można więc traktować jako pewną analogię urządzenia elektronicznego. Jak wiemy, stanowi ono płytkę, na której zamontowana została znaczna liczba zespołów, składających się z kilku typowych elementów (tranzystor, opornik, kondensator, cewka). Funkcja wykonywana przez płytkę zależy jednak nie od tego z ilu i jakich elementów została zestawiona, ale od tego w jaki sposób te elementy ze sobą współdziałają, a więc od tego jaki obwód został z nich złożony. Wiemy, że z tych samych elementów można zestawić obwody spełniające zupełnie różne funkcje.

Z przyjętej definicji wynika, że materiały stosowane w technice muszą być dobrze scharakteryzowane, to znaczy muszą mieć precyzyjnie określone te wszystkie ich elementy, a więc cechy budowy fazowej i mikrostruktury, które są ważne dla uzyskania wymaganej właściwości, a również wystarczają dla odtworzenia materiału. Dzięki rosnącej wiedzy o związkach występujących między mikrostrukturą i właściwościami możemy odejść od starej zasady charakteryzowania materiału poprzez technologię jego przygotowania (np stal hartowana lub ulepszona cieplnie), ponieważ metoda, za pomocą której mikrostruktura została wytworzona nie stanowi o jakości materiału. Podobnie odchodzimy od charakteryzowania materiału poprzez jego właściwości (np stal odpuszczona na taką lub inną twardość) gdyż właściwości zależą od budowy fazowej i mikrostruktury, a więc tylko wtedy mogą zostać wykorzystywane do charakteryzowania materiału, gdy zależność taka oparta jest jednoznacznie na bezpośrednim związku między strukturą i właściwościami.

Podsumowując przeprowadzone rozumowanie można metodę projektowania (czy doboru) materiału do konkretnego zastosowania określić jako proces dwustopniowy:

1. najpierw poprzez wybór składu chemicznego projektujemy strukturę fazy czy faz powstającego materiału, ustalając na tej drodze typ wiązania międzyatomowego oraz określając sposób rozmieszczenia atomów traktowanych jako elementy konstrukcji. Dzięki temu wpływamy na rozkład elektronów walencyjnych w układzie i decydujemy o tych właściwościach, które zależą od budowy fazowej. Równocześnie musimy dobrać technologię za pomocą której zostanie przeprowadzona synteza zaprojektowanej fazy.
2. następnie wykorzystując wiedzę o naturze związków istniejących pomiędzy mikrostrukturą i właściwościami, projektujemy odpowiednią jej architekturę, a na drodze korekcji składu chemicznego niewielkimi ilości dodatkowych pierwiastków (nie zmieniającymi jednak budowy fazowej), wpływamy na zachowanie i wzajemne oddziaływanie elementów mikrostruktury, ustalając w ten sposób zależne od niej właściwości. Równocześnie dobieramy proces technologiczny, który doprowadzi do otrzymania tej mikrostruktury.

Należy pamiętać, że dobór (czy projektowanie materiału) tylko w wyjątkowych przypadkach następuje na podstawie jednej jego cechy, czy właściwości, zwykle bowiem stajemy przed koniecznością poszukiwania kompromisu pomiędzy sprzecznymi ze sobą właściwościami oraz sprzecznymi wymaganiami. Zazwyczaj podwyższanie

jednej właściwości powoduje obniżanie innej: np. wzrost twardości z reguły prowadzi do spadku plastyczności i pojawienia się podatności do niebezpiecznego kruchego pęknięcia, a wzrost przewodności cieplnej wiąże się ze spadkiem właściwości elektroizolacyjnych. Posługując się metodą inżynierii materiałowej znajdujemy drogę rozwiązywania tych sprzeczności. Zobrazujemy ją dwoma przykładami zaczerpniętymi z techniki kosmicznej.

Dysze silników rakiet kosmicznych, mają postać ogromnych wydrążonych stożków, w których gazy powstałe w wyniku spalania paliwa są przyspieszane do ponaddzwiękowych prędkości. Temperatury tych gazów, sięgające 3000°C są zbyt wysokie, aby mogły je wytrzymać najlepsze nawet stopy metali, więc początkowo musiano stosować niższe temperatury spalania, a ścianki metalowych dysz poddawać intensywnemu chłodzeniu, co wymagało stosowania bardzo ciężkich i zawodnych układów odprowadzających ciepło⁶³. Aby uzyskać konstrukcję lżejszą i trwalszą trzeba było poszukać rozwiązania nie w obszarze techniki chłodzenia, lecz w nowych materiałach. Zainteresowano się węglem (grafitem), gdyż ma on temperaturę topnienia przekraczającą 3400°C a jego gęstość jest czterokrotnie niższa niż stopów żaroodpornych. Należało tylko zadbać, aby gazy spalinowe nie zawierały wolnego tlenu i zapewnić dyszy dostateczną wytrzymałość. Tu pojawił się problem, ponieważ, grafit jest materiałem słabym mechanicznie zarówno ze względu na swoją specyficzną budowę (o której była mowa w jednym z poprzednich wykładów) jak i dlatego, że występują w nim liczne submikroskopowe szczelinki, na których łatwo zachodzi inicjacja pęknięcia. Jeżeli jednak wykonamy z grafitu, lub innego podobnego materiału włókna o średnicy rzędu kilku mikrometrów, to jak już mówiliśmy, prawdopodobieństwo występowania w nich szczelin o niebezpiecznych wymiarach ogromnie maleje. Opanowanie umiejętności wykonywania włókien węglowych o wytrzymałościach na rozciąganie kilkakrotnie wyższych od stali pozwoliło na zastosowanie do budowy dysz lekkiego i sztywnego kompozytu wykonywanego z polimeru wzmocnionego włóknami węglowymi. W czasie pracy silnika rakietowego polimer stopniowo ulegał pirolizie, przez co zwęglające się ścianki dysz stawały się coraz cieńsze, tak więc ich wyjściowa grubość musiała być znaczna, aby coś z nich jeszcze zostało pod koniec przewidywanego czasu pracy silnika. Kolejne rozwiązanie polegało na zastosowaniu kompozytów, w których włókna węglowe znajdują się nie w polimerowej ale węglowej osnowie. Dzięki temu uzyskano jeszcze lepsze wyniki, gdyż kompozyt węglowy nie ulegał degradacji w czasie pracy silnika, co pozwoliło dziesięciokrotnie zmniejszyć ciężar dyszy przy takich samych parametrach pracy. Odporność na utlenianie poprawiono pokrywając powierzchnię dyszy warstwą węgla krzemowego. Pozwoliło to na dalsze podwyższenie temperatury spalania i zwiększenie siły ciągu silnika, a co więcej uzyskano możliwość jego ponownego wykorzystania. Stało się to ważne gdy podjęto się budowy promów kosmicznych.

Jednak główny problem, który pojawił się przy projektowaniu promu kosmicznego związany był z koniecznością zabezpieczenia jego wnętrza przed wpływem ciepła generowanego w wyniku tarcia o gęste warstwy atmosfery podczas powrotu na ziemię. Ilości tego ciepła są tak ogromne, że w przeciwieństwie do poprzedniego przykładu, od początku było wiadomo, że rozwiązanie jego można uzyskać tylko na drodze materiałowej. W tym celu małe, niesterowalne kabiny kosmiczne powlekano warstwą kompozytowego materiału ablacyjnego o tak dobranym cieple parowania i grubości, aby wytworzone na powierzchni ciepło zostało zużyte w procesie sublimacji materiału i odprowadzone do atmosfery w postaci pary (czy raczej plazmy), kosztem ubywania warstwy. Metoda była skuteczna, jednak nie pozwalała na powtórne wykorzystanie kabiny. W przypadku bardzo kosztownego, sterowalnego i wielkiego promu kosmicznego podobne rozwiązanie musiało zostać odrzucone, gdyż z założenia miał być on używany

⁶³w pierwszych raketach balistycznych stosowano rozwiązanie wymyślone przez von Brauna przy budowie rakiety V-2 podczas drugiej wojny światowej : dysze chłodzono ciekłym paliwem przed jego doprowadzeniem do komór spalania., uzyskując dodatkowy efekt jakim było jego wstępne podgrzanie.

wielokrotnie, poza tym jego masa była by wtedy zbyt wielka. Problem pokonano dzięki skonstruowaniu niezwykłych płytek ceramicznych o grubości 2,5 cm i powierzchni ok 25 cm² (na pokrycie promu typu Challenger potrzeba było 30757 takich płytek) ważących tyle co pudełko zapalek, o nadzwyczajnych właściwościach cieplnych: można je wziąć do ręki w kilka sekund po wyjęciu z nagrzanego do czerwoności pieca!. Zbudowano je z prostopadle ułożonych względem powierzchni, porowatych włókien krzemu o wielkiej czystości. Krzem jest bardzo lekki (0,353 g/cm³) i posiada mały współczynnik przewodzenia ciepła. Pokrywając zewnętrzną stronę płytki specjalnie spreparowaną czarną warstwą o wysokiej emitancji, zawierającą czterobok krzemu, a na wewnętrznej wytwarzając warstwę odblaskową uzyskano w efekcie to, że szybkość odprowadzanie ciepła z powierzchni na drodze promieniowania stała się większa od szybkości przepływu ciepła z wnętrza płytki poprzez wolno przewodzące krzemowe włókna. Efektywność działania jest tak wysoka, że mimo, iż w czasie przechodzenia przez atmosferę zewnętrzna powierzchnia płytki nagrzewa się do około 1260°C, to temperatura jej aluminiowego odblaskowego podłoża nie przekracza 180°C. Materiał płytek został dodatkowo ulepszony przez wprowadzenie do osnowy składającej się z włókien krzemu pewnej ilości włókien z tlenku aluminium i azotku boru. Spowodowało to poprawienie jakości mechanicznego połączenia poszczególnych włókien i zmniejszyło rozszerzalność cieplną płytki. W wyniku tych zabiegów uzyskały one większą odporność na gwałtowne zmiany temperatury (udary cieplne), a wzrost wytrzymałości pozwolił na zmniejszenie ich ciężaru o 45%. Poza tym azotek boru podwyższył dodatkowo ich odporność na utlenianie. Wreszcie wprowadzono do osnowy płytek nieco sproszkowanego węgla krzemu, co poprawiło emitancję promieniowania podczerwonego i zabezpieczyło je przed skutkami uszkodzenia zewnętrznej warstwy odpromieniowującej, ponieważ bez węgla krzemu następowało wtedy natychmiastowe stopienie aluminiowej warstwy podłoża. Trudno nazwać taką płytkę materiałem. Jest to raczej konstrukcja, w której celowe połączenie właściwości różnych materiałów zapewnia spełnianie sprzecznych funkcji. Gdyby nie to, należałoby stosować niezwykle skomplikowane i ciężkie urządzenia mechaniczne do akumulacji i transmisji ciepła, niemożliwe do zainstalowania na statku kosmicznym.

W trakcie wykładu chcieliśmy pokazać, że sukcesy Nauki o Materiałach i Inżynierii Materiałowej stanowią materialne jądro epoki odkryć naukowych, ujawniające się w nowych, powstających w laboratoriach naukowych materiałach, które stwarzają nowe jakości. Oprócz półprzewodników powstałych na bazie germanu i krzemu powstały również półprzewodniki grupy III-V (na bazie InAs, InP, GaAs) a obecnie także grupy II-VI, o niezwykłych właściwościach opto-elektronicznych, przy czym równocześnie nastąpił wzrost skali integracji wykonywanych z nich obwodów, co wymagało rozwiązania niezwykłych problemów materiałowych i technologicznych (Rys 28). Szczególną rolę odgrywa tu możliwość tworzenia materiałów warstwowych. Nowe materiały umożliwiły powstanie laserowych technik cyfrowego zapisu informacji rewolucjonizując rynek fonograficzny i otwierając nowe możliwości w obszarze informatyki osobistej (multimedia). Uzyskano wielki wzrost odporności tworzyw metalicznych na działanie bardzo wysokich temperatur, co pozwoliło w ogromnym stopniu zwiększyć moc i sprawność silników cieplnych i umożliwiło sięgnięcie w kosmos. Stopy nadplastyczne pozwalają na stosowanie wobec nich podobnych technologii kształtowania jak te, które stosuje się wobec tworzyw sztucznych. Pojawiły się materiały mające pamięć kształtu. Nastąpiła inwazja materiałów polimerowych i kompozytów. Aktywne polimery wykazują właściwości, którymi można sterować przez poddawanie materiałów działaniu bodźców elektrycznych czy optycznych. Najnowsze generacje materiałów kompozytowych umożliwiają uzyskiwanie niespotykanych stosunków sztywności do gęstości. Nowa ceramika otwiera nieoczekiwane dotąd zastosowania, wybiegające znacznie poza tradycyjne materiały ogniotrwałe. Zapoczątkowane to zostało opracowaniem ferrytów, czyli miękkich materiałów magnetycznych wykonanych z magnetytu (Snoek 1947 r.), które stanowią m.inn. nieodłączny element przenośnych urządzeń radiowych. Nowe

generacje wysokoenergetycznych materiałów magnetycznych pozwoliły dokonać miniaturyzacji silników elektrycznych i innych układów np takich jak głośniki. Warstwowe materiały magnetyczne stanowią podstawowy nośnik zapisu informacji. Wielkie sukcesy odniesiono w syntezie materiałów supertwardych, niezbędnych dla precyzyjnych i wysoce wydajnych obróbek wykończeniowych: nauczono się wytwarzać syntetyczny diament, najtwardszy występujący w przyrodzie materiał, oraz otrzymano równie twarde, nie występujący w naturze azotek boru o sieci diamentu. W ostatnich latach odkryto nowe, wysokotemperaturowe materiały nadprzewodzące, wykazujące ten efekt już nie w temperaturach ciekłego helu, ale w łatwo dostępnych technicznie temperaturach ciekłego azotu co stwarza perspektywy na techniczne zastosowania, oraz nową odmianę węgla - fulleren węgłowy. Powstały szkła światłowodowe o niezwyklej przezroczystości, umożliwiające przesyłanie impulsów światła bez wzmocnienia na odległości setek kilometrów. Stworzono biomateriały które mogą służyć jako podkładki np dla regenerowania ludzkiej skóry, opracowano też niezwykle tworzywa będące przetwornikami bodźców najróżniejszego charakteru i wykorzystywane jako czujniki niezbędne dla realizacji procesów sterowania i kontroli, otwierające drogę do tak zwanych inteligentnych technologii. Wreszcie zaczęto poszukiwać nowych jakości poprzez tworzenie struktur o obniżonej wymiarowości, gdyż w strukturach dwuwymiarowych można uzyskać znacznie większą niż w strukturach trójwymiarowych wydajność procesów kolizyjnych, które odpowiadają za właściwości elektroniczne czy magnetyczne. Końca tej drogi nie widać.

Reasumując nasze rozważania dotyczące materiałów i inżynierii materiałowej możemy stwierdzić, że metoda inżynierii materiałowej dzięki dostarczeniu na rynek zupełnie nowych materiałów pozwoliła na stworzenie nowych gałęzi techniki i nowych produktów o bardzo wysokiej wartości dodanej: zarówno elektroniki, fotoniki i techniki kosmicznej, jak też nie tępiących się nożyków do golenia czy wyczynowego sprzętu sportowego i wielu innych. Wymaga ona jednak zerwania z utartymi schematami myślowymi przez przeorientowanie się na głębokie zrozumienie istoty tworzyw, na projektowanie bardziej niż dotąd wykorzystujące ich naturę, na ścisłą współpracę między specjalistami materiałowymi, fizykami i konstruktorami.

10. GENEZA INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ

Pierwszym materiałem, którym zainteresowała się nauka nowożytna była tajemnicza i nieprzewidywalna w swoim zachowaniu stal. Od czasu przeprowadzonego w 1799 r. przez Cloueta i de Morveau (Francja) doświadczenia, w którym otrzymano ją przez stopienie tygielka z miękkiego, czystego żelaza do którego włożono diament, wiadomo było, że stal jest stopem żelaza z węglem. Odkrycie to, wraz z rozwojem metod analizy chemicznej oraz wykryciem roli utleniania w metalurgicznym procesie rafinacji stali, zaowocowało wkrótce wydajnymi technologiami jej produkcji. Sukces ten spowodował, że analiza chemiczna stała się główną metodą charakteryzowania metali, dzięki czemu w początkowym okresie materiały (a właściwie metale) stanowiły domenę zainteresowania chemii i metalurgii. Chemiczno-metalurgiczne podejście do metali sprowadzało się do rozpatrywania związku ich składu chemicznego i technologii wytwarzania z podstawowymi cechami użytkowymi (plastyczność, twardość, kruchość).

Za twórcę metalografii, czyli dyscypliny zajmującej się badaniem i opisywaniem mikrostruktury materiałów uznaje się powszechnie angielskiego mineraloga H.C. Sorby'ego (1826-1908), który wynalazł mikroskop pracujący w świetle odbitym, a więc umożliwiający wygodne badanie nieprzezroczystych preparatów. Poddał on obserwacjom wytrawione chemicznie zgłady próbek ze stali, odkrywając jej składniki fazowe. Wyniki tych obserwacji Sorby opublikował jednak dopiero w roku 1887, gdy zastosowanie mikroskopu do badań stali stawało się coraz powszechniejsze dzięki pracom Anosowa w Rosji (1841 r.) i Martensa w Niemczech (1878 r.)

Równocześnie, wraz z rozwojem w budownictwie konstrukcji stalowych i matematycznych metod ich projektowania pojawiła się konieczność opracowania metod charakteryzowania mechanicznych właściwości materiałów⁶⁴. W 1870 roku procedura badań mechanicznych była już dobrze ustalona i doprowadziła do wykrycia wielu niezwykłych efektów związanych z odkształcaniem plastycznym, na których pełne wyjaśnienie trzeba było czekać blisko sto lat. Natomiast teoria sprężystości, zapoczątkowana doświadczeniem Younga (1807 r.) a uwieńczona teoretycznymi pracami Cauchy'ego (1822 r.) została doprowadzona do stanu bliskiego współczesnemu.

W tym samym czasie pierwsi metalografowie zaobserwowali, że mikrostrukturę możemy kształtować przez zmiany składu chemicznego i na drodze odpowiednich zabiegów cieplnych oraz, że między mikrostrukturą a cechami użytkowymi materiału istnieje związek bezpośredni. Stwierdzono też, że występująca w mikrostrukturze stali faza wpływająca na twardość stali, którą nazwano cementytem jest węglikiem żelaza Fe_3C (Abel 1888 r.). Mikrostruktura materiału stawała się więc kluczem do zrozumienia jego natury. Wielki wpływ na kształtowanie się tego nowego poglądu na materiały miały prace nad wyjaśnieniem zjawiska prowadzącego do umocnienia stali podczas hartowania. Od niepamiętnych czasów było wiadomo, że rozgrzane do czerwoności „żelazo” po zanurzeniu w wodzie staje się bardzo twarde, jednak zabieg ten, nazywany hartowaniem był niezrozumiały i dawał niepowtarzalne efekty. Czernow w Rosji (1868 r.) badając różne czynniki wpływające na jakość luf armatnich odkrył, że aby stal się zahartowała musi zostać uprzednio nagrzana powyżej ściśle określonej, krytycznej temperatury. Był to podstawowy krok na drodze stworzenia naukowych podstaw dla technologii obróbki cieplnej stali. Francuz Osmond (1895) postawił na tej podstawie hipotezę, że żelazo podlega przemianom alotropowym, zaobserwował też, że hartowanie prowadzi do pojawienia się w mikrostrukturze stali nowej fazy, którą na cześć Martensa nazwał *martenzytem*. Kontrowersje na temat jej pochodzenia trwały nieprzerwanie aż do okresu po pierwszej wojnie światowej, gdy w wyniku zastosowania w badaniach budowy fazowej nowo odkrytej metody dyfrakcji promieni rentgenowskich stwierdzono, że jest ona nierównowagowym przesyconym roztworem węgla w niskotemperaturowej odmianie alotropowej żelaza.

⁶⁴ Historię tych prac niezwykle interesująco opisał Timoshenko w przetłumaczonej na język polski *Historii Wytrzymałości Materiałów* (Arkady 1966).

Wkrótce metalami zaczęli interesować się oprócz chemików, metalurgów i metalografów, również fizycy, co wiązało się z wywołaną rozwojem zastosowań elektryczności praktyczną potrzebą opracowania materiałów, które mogłyby służyć jako przewodniki, oporniki oraz magnesy zarówno twarde jak i miękkie. Spowodowało to znaczny wzrost zainteresowania metalami innymi niż stal, doprowadziło do odkrycia roli zanieczyszczeń w metalach i istnienia faz międzymetalicznych (Matthiessen 1867 r.), a także stworzenie założeń teorii stopów (Raoult 1883 r.). Wielkie znaczenie dla rozwoju badań nad stopami miało wynalezienie przez Le Chateliera (1888 r.) dokładnej metody pomiaru temperatury przy zastosowaniu termopary, czyli przetwornika energii cieplnej na elektryczną wykorzystującego efekt termoelektryczny odkryty przez Seebecka w 1821. Pozwoliło to na zastosowanie metod analizy termicznej do badania wpływu składu chemicznego i temperatury na budowę fazową stopów, a więc dla wyznaczania wykresów równowagi fazowej przy wykorzystaniu termodynamicznych zasad opracowane jeszcze w 1876 r. przez Gibbsa. Badanie układów równowagi stanowi do dzisiaj aktywną dziedzinę nauki ze względu na ich podstawowe znaczenie dla projektowania materiałów.

Niezwykle pobudzającym wyobraźnię okazało się odkrycie zjawiska rekrytalizacji, dzięki któremu umocniony w wyniku odkształcenia plastycznego, a następnie ogrzany do wysokiej temperatury metal powraca do swoich pierwotnych właściwości, co związane jest z dramatycznymi zmianami mikrostruktury (Kalisher 1881 r.) związanymi z procesem zarodkowania i rozrostu nowych ziarn (Stead 1898 r.)

Ten wczesny, metalograficzny okres rozwoju stworzył techniczne i intelektualne podstawy do badania związków między budową fazową, mikrostrukturą i właściwościami metali i ich stopów. Prace nabrały zorganizowanego charakteru, do czego przyczyniły się intensywne zbrojenia w przededniu I wojny światowej, co szybko doprowadziło do wykształcenia się nowej, rozwijanej do dzisiaj dyscypliny nazwanej metaloznawstwem, której metalografia stała się częścią składową. Metaloznawstwo trudni się badaniem budowy fazowej metali i stopów oraz zachodzących w niej przemian w punkcie widzenia mikrostruktury oraz jej relacji z technologią i właściwościami, głównie mechanicznymi. Pochodzenie słowa „metaloznawstwo” stanowi niezwykle przykładowy przykład zawitych dróg powstawania terminologii naukowej. Zostało ono zastosowane w Polsce na początku lat dwudziestych przez profesora AGH w Krakowie I. Feszczkę-Czopińskiego, ukrainka z pochodzenia i wywodzi się od niemieckiego terminu *Metallkunde*, wymyślonego z kolei przez pracującego wówczas w Niemczech Polaka J. Czochralskiego⁶⁵. Przyjęty jest on również w języku rosyjskim (*metallowiedenie*). W krajach anglosaskich natomiast zastosowano dla tej dyscypliny wprowadzona w roku 1914 przez Rosenhaina nazwę *physical metallurgy*, którą również adoptowano we Francji (*metallurgie physique*). Jednak zarówno w Polsce jak i we Francji jeszcze przez wiele lat termin metalografia był stosowany jako synonim metaloznawstwa, co było oczywistym błędem semantycznym. Jedną z charakterystycznych cech metaloznawstwa, która stanowiła klucz do jego późniejszych sukcesów i wyróżnia je spośród innych dyscyplin, stanowi leżące u jego podstaw nierozzerwalne powiązanie zrozumienia naukowego natury metali i ich stopów z aspektami technologicznymi odnoszonymi do ich syntezy, przetwórstwa i zastosowania. Z tej przyczyny, od samego początku metaloznawstwo było równocześnie zarówno dyscypliną naukową, jak i dziedziną techniki. Znaczenie tego związku dla rozwoju dyscypliny zostało dostrzeżone już przez Czochralskiego, a pół wieku później stał się on główną ideą inżynierii materiałowej.

Naturalną konsekwencją wniknięcia przez metaloznawców w problemy budowy wewnętrznej metali była konieczność wykorzystania osiągnięć w fizyce, chemii i krystalografii. W tym okresie jednak metaloznawcy lepiej od fizyków rozumieli naturę metali. Już wtedy prowadzili badania nad zjawiskami odkształcenia plastycznego, stwierdzając jego krystalograficzny charakter (Ewing i Rosenhain), analizowali budowę granic ziarn (Rosenhain), mechanizmy krystalizacji i przemian fazowych (Tammann) i wiele innych.

Tuż przed pierwszą wojną światową miały miejsce dwa zdarzenia, które doprowadziły do utworzenia trwałego związku pomiędzy fizyką i metaloznawstwem. W obrębie metaloznawstwa było to przypadkowe odkrycie w 1906 r. przez Wilma w Niemczech zjawiska starzenia stopów Al-Cu, czyli umocnienia zachodzącego w tym stopie po szybkim ochłodzeniu z wysokiej

⁶⁵wydany w 1924 podręcznik Czochralskiego miał tytuł *Moderne Metallkunde in Theorie und Praxis*

temperatury i długim wytrzymaniu w temperaturze pokojowej. Związane ono jest z przemianami fazowymi, które przebiegają w niedostępnej dla ówczesnych metod obserwacji skali mikrostruktury⁶⁶. W obrębie fizyki natomiast zdarzeniem takim było odkrycie przez von Lauego (1912 r.) dyfrakcji promieni rentgenowskich (promieni X) na sieci krystalicznej i stwierdzenie przy ich pomocy przez Braggów (ojca i syna), że metale mają strukturę krystaliczną, co potwierdziło dawne już przypuszczenie metaloznawców⁶⁷. Włączyło to krystalografię w obszar zainteresowania metaloznawstwa i dostarczyło nowej, podstawowej do dziś dla nauki o materiałach techniki doświadczalnej. Otworzyła ona możliwość zmiany skali rozpatrywania struktury metali dzięki wnikięciu w budowę fazową poprzez analizę jej sieci krystalicznej, a więc wyjścia poza dotychczasowe ograniczenia rozdzielczości mikroskopu optycznego. Rozważania na temat budowy materiałów w skali atomowej nabrały tym samym sensu fizycznego. Był to przełomowy moment w wyniku którego nastąpiło utrwalenie metaloznawstwa jako samodzielnej dyscypliny.

Następny etap związany był z rewolucyjnym rozkwitem fizyki w latach dwudziestych, co doprowadziło do stworzenia podstaw elektronowej teorii metali (Bloch, Sommerfeld i wielu innych), wiążącej podstawowe właściwości ciał stałych z zachowaniem elektronów. Osiągnięcia te spowodowały rozwój teorii stopów metalicznych (Hume-Rothery). Również i fizyka znajdowała inspirację w metaloznawstwie, gdy okazało się, że obserwowanych w metalach zjawisk nie można objaśnić zakładając, iż atomy w sieci krystalicznej są idealnie uporządkowane. W rezultacie w latach trzydziestych powstały podwaliny teorii defektów budowy krystalicznej: defektów punktowych (atom międzywęzłowy - Frenkel 1926 r., wakans - Schottky 1935 r.), dyslokacji (Taylor, Orowan, Polyani 1934 r.), oraz granic ziarn (Hargreaves i Hill 1929 r.). Stworzone zostały w ten sposób podstawy dla zrozumienia zjawisk związanych z odkształcaniem plastycznym i umacnianiem metali, które zostały podsumowane w słynnej książce Schmidta i Boasa, wydanej w Berlinie w 1935 r. a wznawianej jeszcze w 1968!. Rozwój wiedzy o przemianach fazowych w stalach (Bain, Davenport 1929 r., Mehl 1930 r.) i innych stopach wiązał się ze stworzoną przez fizyko-chemików teorią dyfuzji w ciele stałym (Grube 1932 r., Matano 1933 r.). Te osiągnięcia odnosiły się głównie do metali, jednak stopniowo strukturalne podejście zaczęto stosować również wobec innych materiałów. W latach trzydziestych chemicy ustalili makrocząsteczkową naturę polimerów zapoczątkowując nową dziedzinę, która wkrótce niebawem się rozwinęła, powstały też podstawy mikrostrukturalnego podejścia do ceramik.

W początku lat czterdziestych istniały więc gotowe teoretyczne ramy dla naukowego rozwiązywania problemów materiałowych, głównie jednak w dziedzinie metali. Zostały one podsumowane w redagowanej przez Mehla wielotomowej serii książek wydawnictwa McGraw-Hill (Nowy Jork) zatytułowanej *Metallurgy and Metallurgical Engineering*. Najślawniejsze pozycje z tej serii to *Structure of Metals* Barreta (1943 r., kolejne wydania uzupełniane przez Massalskiego⁶⁸ ukazują się do dzisiaj), oraz Seitza *The Physics of Metals* (1943). W wyniku tych procesów nastąpiło wyodrębnienie się nowej dyscypliny nauki: fizyki metali⁶⁹.

W tym samym okresie realizacja wielkich programów technicznych, a przede wszystkim programu atomowego, wymusiła bezpośrednią współpracę metaloznawców, fizyków, chemików i krystalografów w ramach organizowanych przez państwa międzydyscyplinarnych zespołów badawczych, co przyspieszyło proces stopniowego przenikania się tych dyscyplin. W wyniku boomu edukacyjnego po zakończeniu II Wojny Światowej na uczelniach pojawiło się liczne pokolenie doskonale wykształconych ludzi trudniących się badaniami naukowymi. Przyczyny te doprowadziły do ogromnego wzrostu intensywności i efektywności badań naukowych (tzw. rewolucja naukowo-techniczna). Jednym ze skutków tego procesu wiążącym się bezpośrednio ze wzrostem zainteresowania innymi materiałami niż metale, a przede wszystkim półprzewodnikami, które, dzięki odkryciu tranzystora (por str. 24) nabrały nagle ogromnego znaczenia, było

⁶⁶ Naturę tego zjawiska odkryli dopiero w 1935 niezależnie od siebie Guinier i Preston

⁶⁷ W 1970 r. uczestniczyłem w uroczystości nadania przez Uniwersytet w Cambridge tytułu doktora honoris causa wówczas osiemdziesięcioletniemu sir Williamowi Braggowi (synowi). W swoim przemówieniu promotor stwierdził, że osiągnięcie Bragga miało niezwykle znaczenie: odkrył bowiem strukturę soli, a to jest ważne, gdyż dotyczy naszych zarobków (gra słów: źródłosłów em słowa *salary* czyli pensja jest *salt* - sól).

⁶⁸ Tadeusz B. Massalski, dr.hon.causa Politechniki Warszawskiej, zagr. czł. PAN, jest profesorem w Carnegie Mellon University w Pittsburgu (USA).

⁶⁹ ang. Physics of Metals, franc. Physique des Metaux, niem. Metallphysik, ros. Металлофизика

przekształcenie się Fizyki Metali w jedną z głównych obecnie gałęzi fizyki - Fizykę Ciała Stałego⁷⁰ stanowiącej fundament współczesnej nauki o materiałach. Klasycznym do dziś podręcznikiem stał się napisany na początku lat pięćdziesiątych przez C.Kittel'a *Wstęp do Fizyki Ciała Stałego*⁷¹. W tym okresie podstawy teorii defektów struktury krystalicznej były już dobrze ugruntowane, co tworzyło bazę dla świadomego kształtowania właściwości materiałów (monografie napisane przez Read'a, 1953 i Cottrell'a 1953). Pojawiały się liczne nowe techniki badawcze, a dotychczasowe metody ulegały znacznemu udoskonaleniu. Duże znaczenie miało zastosowanie w połowie lat pięćdziesiątych mikroskopu elektronowego do obserwacji dyslokacji w cienkich foliach metali przez Hirscha ze współpracownikami z Uniwersytetu w Cambridge. Otworzyło to możliwość badania zachodzących w mikrostrukturze procesów związanych z odkształceniem plastycznym i w zdumiewająco dokładny sposób potwierdziło przewidywania teorii dyslokacji. Od tego czasu stało się jasne, że obok elektronowej teorii ciała stałego teoria defektów struktury krystalicznej jest podstawowym elementem zrozumienia właściwości i zachowania się wszystkich ciał stałych. Równocześnie następował intensywny rozwój prac nad naturą defektów struktury krystalicznej, mechanizmami odkształcenia plastycznego i umacniania, budową faz, zjawiskami przemian fazowych, dyfuzją, mechanizmami pęknięcia i zniszczenia radiacyjnego. Podsumowanie uzyskanego stanu wiedzy w zakresie metaloznawstwa przedstawiła w połowie lat sześćdziesiątych zbiorowa monografia *Physical Metallurgy* pod redakcją Cahna⁷².

W tym czasie stało się jasnym, że w odniesieniu do różnych klas materiałów stosuje się „tę samą fizykę”, oraz, że dla ich badania wykorzystuje się te same metody doświadczalne. Na przykład ogromne przyspieszenie badań w obszarze ceramiki konstrukcyjnej nastąpiło w chwili, gdy ta dotąd całkowicie odrębnie rozwijająca się dyscyplina sięgnęła do istniejących już zasobów wiedzy odnoszącej się do defektów struktury krystalicznej. Złożoność prac nad nowymi materiałami wymagała ciągłej współpracy przedstawicieli różnych, niejednokrotnie odległych dyscyplin naukowych i technicznych, co okazało się niezwykle charakterystyczną cechą badań nad materiałami. Stanowiło to powód do pojawienia się bardzo silnych tendencji integracyjnych pomiędzy dotychczas niezależnie rozwijającymi się dyscyplinami. Ta integracja najłatwiej nastąpiła w dziedzinie materiałów krystalicznych: metali i niemetalicznych materiałów nieorganicznych (czyli ceramiki). Doprowadziło to na początku lat sześćdziesiątych do wyłonienia się Nauki o Materiałach i Inżynierii Materiałowej, które włączyły w swoje ramy całość zajmujących się materiałami dziedzin nauki jak metaloznawstwo, ceramika i fizykochemia polimerów, oraz fizyki ciała stałego, krytalografii, chemii fizycznej, mechaniki ośrodków ciągłych oraz elementów związanych bezpośrednio z materiałami dyscyplin inżynierskich. Tak więc stworzona została pewnego rodzaju *interface* między różnymi dziedzinami, które historycznie rzecz biorąc rozwijały się dotąd niezależnie. Potrzeba wyodrębnienia tej dyscypliny spotykała się początkowo z wieloma wątpliwościami. Jednak od chwili opublikowania w 1975 r. raportu, opracowanego przez powołany przez Narodową Akademię Nauk USA komitet COSMAT⁷³, który zdefiniował Naukę o Materiałach i Inżynierię Materiałową jako „obszar wiedzy potrzebnej dla postępu w materiałach a szczególnie dla rozwiązywania złożonych problemów technicznych często nie zgodnych z tradycyjnymi dyscyplinami”, zaczęła ona szybko rozwijać się i zyskiwać uznanie. Związane to było z wykształceniem nowej, niezwykle efektywnej metody rozwiązywania problemów materiałowych współczesnej techniki, o której była mowa w Rozdziale 9.1.

Sukcesy Nauki o Materiałach i Inżynierii Materiałowej, oraz świadomość, że wykształcenie specjalisty materiałowego wymaga innych podstaw, niż te, które były wykładane na rodzimych wydziałach spowodowały w połowie lat sześćdziesiątych stopniowe wydzielanie kształcenia w tym kierunku, z tradycyjnie prowadzonych specjalności materiałowych wydziałów mechanicznych, metalurgicznych, fizycznych czy chemicznych. Proces ten został zapoczątkowany w USA i Anglii, a następnie objął i inne kraje. (Polska 1973, a np. Włochy dopiero pod koniec lat osiemdziesiątych)

Ogromną rolę w kształtowaniu Inżynierii Materiałowej odegrały również nowe międzynarodowe periodyki naukowe: założony w 1949 przez Chalmersa rocznik *Progress in Metal Physics*,

⁷⁰ang. Solid State Physics, niem. Festkörperphysics, ros. Fizika Tverdogo Tela, franc. Physique des Solides

⁷¹ Polskie tłumaczenie trzeciego wydania tej znakomitej książki ukazało się staraniem PWN w 1974.

⁷² wyd North Holland, kolejne uzupełniane i zmieniane wydania 1970, 1983

⁷³Materials and Man's Needs; The Summary Report of the Committee on the Survey of Materials Science and Technology (COSMAT 74). US Academy of Science 1974

przekształcony w 1961 w *Progress in Materials Science*, oraz miesięczniki *Acta Metallurgica* (1952, od 1990r *Acta Metallurgica and Materialia*), *The Journal of Physics and Chemistry of Solids* (1956), *Physica Status Solidi* (1961), *Journal of Materials Science* (1966), *Materials Science and Engineering* (1966) i wiele innych. W 1986 zasłużone dla nauki międzynarodowe wydawnictwo Pergamon Press wydało 8 tomowe dzieło *Encyclopedia of Materials Science and Engineering*, ostatecznie definiujące tę dyscyplinę i podsumowujące aktualny stan wiedzy w dziedzinie materiałów.

Współczesna Nauka o Materiałach i Inżynieria Materiałowa są więc wynikiem dwustu lat rozwoju i ciągłych przekształceń, które rozpoczęły się od kojarzenia ze sobą prostych faktów, a doprowadziły dzisiaj do głębokiego wniknięcia w strukturę ciał stałych i naturę relacji między tą strukturą a makroskopowymi właściwościami i technologią. Dziedziny te odnoszą się do aktywności rzeszy ludzi trudniących się tworzeniem materiałów i nadawaniem im wymaganych właściwości. Nowe nazwy odzwierciedlają jedynie fakt, że aktywność ta niegdyś była sztuką, ale obecnie w miarę rozwoju poszczególnych dyscyplin, zyskała solidne podstawy naukowe.

Nauka o Materiałach i Inżynieria Materiałowa stanowią obecnie spójną dyscyplinę naukową, bezpośrednio łączącą wiedzę o skondensowanym stanie materii z funkcją i osiąganymi materiałami oraz metodami ich syntezy i przeróbki. Spajają one potrzebę wnikania w naturę materii z imperatywem zaspokajania ludzkich potrzeb. Jedność między dyscyplinami je tworzącymi jest jednak ciągle jeszcze luźna, gdyż materiały zawsze stanowiły i zawsze stanowią będą przedmiot zainteresowania różnych dyscyplin naukowych, które zachowują swoją szczegółową odrębność, podczas gdy nauka o Materiałach i Inżynieria Materiałowa tworzą dla nich uogólniające ramy i rozwijają unifikujące idee i metody. Rosnąca złożoność problemów materiałowych wymaga do współpracy coraz to nowych dziedzin wiedzy. Jest to zjawisko naturalne i będziemy z nim mieli zawsze do czynienia, dlatego też musimy być do niego przygotowani intelektualnie, przez ogólne wykształcenie pozwalające na zrozumienie tych szczegółowych dyscyplin.

11. NAUKA O MATERIAŁACH W POLITECHNICE WARSZAWSKIEJ

W Polsce rozwój dyscyplin materiałowych przebiegał innymi drogami, niejako na marginesie wydarzeń zachodzących na świecie. Pierwsze wykłady z metalografii na terenie Polski wygłoszono w zaborze austriackim na Politechnice Lwowskiej, która w 1901 otrzymała prawa akademickie. Prowadził je habilitowany w 1912r dr Witold Broniewski (1880-1939), wykształcony we Francji inżynier elektryk, który doktorat uzyskał w 1911 u prof. Le Chateliera na Sorbonie, gdzie też przed przyjazdem do Lwowa wykładał metalografię. Wykład ten stanowił podstawę pierwszego polskiego podręcznika poświęconego tej dziedzinie (*Zasady metalografii*, 1921). W 1922 r. Broniewski przeniósł się na Politechnikę Warszawską, gdzie objął Katedrę Technologii Metali na Wydziale Mechanicznym, w której istniał utworzony w 1915r Zakład Technologii Metali. Po Broniewskim we Lwowie metaloznawstwo było wykładane przez technologa prof S.Anczyca (1868-1927), w tym czasie w Akademii Górniczo - Hutniczej w Krakowie wykłady metaloznawstwa wprowadził w 1922 prof. I. Feszczenko-Czopiowski (1884-1947), metalurg, autor bardzo nowoczesnego podręcznika *Metaloznawstwo* (jego pierwszy tom ukazał się w 1928).

Zakład Metalurgii PW pod kierownictwem Broniewskiego stał się pierwszym w Polsce ośrodkiem doświadczalnej wiedzy metaloznawczej. Broniewski był legionistą. W pierwszym rządzie po przewrocie majowym 1926 objął tekę ministra robót publicznych, był też członkiem założycielem i długoletnim sekretarzem generalnym Akademii Nauk Technicznych. Silna osobowość Broniewskiego wywarła znaczący wpływ na ukształtowanie tradycji, w zasadniczy sposób ważących na całości studiów technologicznych w Polsce, oraz na koncepcji ulokowania metaloznawstwa (wobec którego zawsze stosował termin *metalografia*) jako pomocniczej dyscypliny w dziedzinie technologii metali, co z perspektywy historycznej okazało się hamującym rozwój metaloznawstwa w Polsce błędem.

Drugą indywidualnością na Politechnice Warszawskiej był prof. Jan Czochrański (1885-1952), pracujący w Niemczech światowej rangi uczonej samouk, założyciel i pierwszy prezes istniejącego do dzisiaj *Deutsche Gesellschaft für Metallkunde*, który w roku 1928 powrócił na zaproszenie Prezydenta RP z Niemiec do Polski, aby pomóc w tworzeniu podstaw materiałowych dla krajowego przemysłu zbrojeniowego. W 1929 r Czochrański otrzymał doktorat *honoris causa* PW aby objąć specjalnie dla niego utworzoną Katedrę Metalurgii i Metaloznawstwa na Wydziale Chemii, a od 1934 kierował równocześnie pracującym na rzecz przemysłu zbrojeniowego badawczym Instytutem Metalurgii i Metaloznawstwa.

Zasadnicze różnice zarówno w osobowości jak i w poglądach na istotę badań naukowych istniejące pomiędzy Broniewskim i Czochrańskim doprowadziły do konfliktu, który swój punkt kulminacyjny znalazł w 1938 roku w głośnym procesie, wygranym zresztą przez Czochrańskiego. Broniewski zmarł na początku 1939, a Czochrański, którego postawa w czasie okupacji niemieckiej nie była jednoznacznie oceniana, został w roku 1945 odsunięty od Politechniki i umarł w zapomnieniu w rodzinnej Kcyni w 1953 r, a więc gdy już działał pierwszy tranzystor zbudowany w laboratorium Bella (USA) z kryształów germanu wyprodukowanych opracowaną przez Czochrańskiego metodą.

Konflikt między dwoma najwybitniejszymi metaloznawcami II Rzeczypospolitej negatywnie zaciążył na rozwoju polskiego metaloznawstwa po drugiej wojnie światowej, tym bardziej, że ani Broniewski, ani Czochrański nie pozostawili na Politechnice Warszawskiej równie wybitnych i dynamicznych następców. Na marginesie należy wspomnieć, że większość późniejszych profesorów wyszło ze szkoły Czochrańskiego.

Kształcenie w dziedzinie metaloznawstwa odbudował po 1945 roku w Politechnice Warszawskiej i równolegle w Szkole Inżynierskiej im. Wawelberga i Rotwanda profesor Kornel Wesołowski (1903-1976, dyplomant Czochrańskiego a później asystent Broniewskiego, autor wielu podręczników metaloznawstwa). W roku 1951, po przyłączeniu Szkoły im. Wawelberga i Rotwanda do

Politechniki istniały na niej dwie katedry metaloznawstwa. Jedną z nich była katedra profesora Wesołowskiego na nowo powstałym Wydziale Mechanicznym Technologicznym. Druga istniała na Wydziale Lotniczym, kierował nią profesor Michał Śmiałowski, 1906-1991, doktorant Czochralskiego, specjalista w zakresie korozji metali, czł. PAN, a w latach 1946-1952 prof. Politechniki Śląskiej). Kolejnymi jej kierownikami byli absolwent Politechniki Lwowskiej prof. Z.Bochenek, oraz uczeń Czochralskiego prof. S.T.Jaźwiński. W tym czasie w AGH w Krakowie wykłady prowadzili współpracownik Broniewskiego prof. Aleksander Krupkowski (czł. PAN) oraz uczniowie Feszczuki-Czopińskiego: Władysław Łoskiewicz, Stanisław (?) Jasiewicz, a później Tadeusz Malkiewicz (czł. PAN). W Politechnice Gliwickiej specjalizację metaloznawczą uruchomił przesiedlony z Politechniki Lwowskiej prof. Fryderyk Staub, a w Politechnice Łódzkiej uczennica J.Czochralskiego prof. Zofia Wendorff (zm.1991). Specjalizacja metaloznawcza prowadzona była na wydziałach mechanicznych, z wyjątkiem AGH, gdzie została ulokowana na wydziałach metalurgicznych.

Zniszczenia wojenne i odseparowanie od tego co działo się na świecie spowodowało, iż metaloznawstwo w Polsce długo utrzymywało się w wykształconym jeszcze przed wojną klasycznym nurcie. Sytuacja zaczęła ulegać zmianie w połowie lat pięćdziesiątych, gdy stała się osiągalna literatura zachodnia, między innymi poprzez łatwo dostępne i tanie rosyjskie tłumaczenia najważniejszych pozycji światowej literatury naukowej. Znaczną rolę w uwspółcześnieniu nauczania w Politechnice Warszawskiej odegrali Jerzy Kaczyński (1908-1977, uczeń Czochralskiego), współautor wraz z Stanisławem Prowansem (zm.1992) z Politechniki Szczecińskiej pierwszego nowoczesnego polskiego podręcznika podstaw metaloznawstwa⁷⁴, oraz należący już do powojennego pokolenia Bohdan Ciszewski (zm. 1998) później profesor Wojskowej Akademii Technicznej, czł. PAN).

Przyjęcie koncepcji Broniewskiego, traktującej metaloznawstwo jako pomocniczy dział technologii metali spowodowało, że metaloznawstwo miało w Polsce trudności z wyodrębnieniem się w niezależną dyscyplinę naukową, nie powstały też na wyższych uczelniach, wzorem innych krajów odrębne kierunki studiów metaloznawczych. Sprzyjały temu rozbitcie środowiska, wynikające ze starych konfliktów i typowo polska nieumiejętność łączenia wysiłków dla osiągnięcia wspólnych celów. Przeciwdziałania temu stanowi rzeczy, w których główną rolę odgrywał profesor AGH Tadeusz Malkiewicz (czł. PAN), nie zapobiegły jednak dalszemu ograniczaniu roli metaloznawstwa w programach wyższych uczelni.

W roku 1969, w następstwie wypadków marcowych, nastąpiła reorganizacja wyższych uczelni, której głównym celem było podporządkowanie ich czynnikom partyjno - administracyjnym. Katedry zostały zlikwidowane, a na ich miejsce utworzone zostały Instytuty Wydziałowe. Na Wydziale Mechanicznym Technologicznym PW dotychczasowa Katedra Metaloznawstwa została przekształcona w Instytut Materiałoznawstwa (dyrektorami byli kolejno w latach 1970-1972 prof. Stefan Wojciechowski, a w latach 1972-1975 doc. Tadeusz Karpiński) a katedra istniejąca na Wydziale Maszyn Energetycznych i Lotnictwa przeobraziła się w Instytut Inżynierii Materiałowej (prof.S.T.Jaźwiński)

W początku lat siedemdziesiątych, w następstwie kredytów przyznanych wtedy Polsce, nastąpiła znaczna poprawa stanu wyposażenia laboratoriów, równocześnie powstało kilka centralnych programów badawczych poświęconych sprawom materiałowym, co przyczyniło się do znacznego wzrostu aktywności naukowej. Wejście na arenę nowego pokolenia pracowników naukowych, z których większość odbywała studia i staże naukowe w renomowanych uczelniach zagranicznych, przyczyniło się stopniowo do radykalnej zmiany sytuacji w środowisku i jego integracji, a nazwiska polskich autorów zaczęły coraz liczniej pojawiać się w międzynarodowych periodykach. Integracji sprzyjały też ogólnopolskie konferencje Mikroskopii Elektronowej Ciała Stałego których niestrudzonym animatorem był prof. Stanisław Gorczyca z AGH (uczeń prof. Jasiewicza) oraz kolejne Konferencje Metaloznawcze.

Jednak zrozumienia znaczenia integralnego podejścia do problematyki materiałowej, charakterystycznego dla inżynierii materiałowej z wielkim trudem torowało sobie drogę i prawo obywatelstwa w polskich środowiskach naukowych, nawet w grupie najwybitniejszych

⁷⁴ J.Kaczyński S. Prowans: Podstawy Teoretyczne Metaloznawstwa, Wyd. Śląsk, Katowice 1959, drugie wydanie 1972

przedstawicieli wiedzy metaloznawczej. Utworzenie odrębnego kierunku studiów Inżynieria Materiałowa, nastąpiło wreszcie w 1971 dzięki wpływom prof. Adama Gierka (Pol. Śląska, czł. PAN) i prof. S.T. Jaźwińskiego (od 1965 w Pol. Warszawskiej), co wywołało liczne kontrowersje i niechęć znacznej części środowiska. Nowy kierunek uruchomiony został początkowo na Wydziale Metalurgicznym Politechniki Śląskiej (prof. A. Gierek, prof. Adolf Maciejny) oraz na Wydziale Ceramiki AGH (prof. Stanisław Mrowec, czł. PAN i prof. Marian Pampuch, czł. PAN). Na Politechnice Warszawskiej studia na inżynierii materiałowej otwarto w 1973, a w 1975 z połączenia instytutów istniejących uprzednio na Wydziale Mechanicznym Technologicznym i na Wydziale Maszyn Energetycznych i Lotnictwa utworzony został samodzielny Instytut Inżynierii Materiałowej (z prawami wydziału). Jego organizatorem i pierwszym dyrektorem był prof. S. Wojciechowski. Instytut ten w 1992 roku przekształcił się w Wydział Inżynierii Materiałowej.

Obecnie dawne animozje środowiska znikły, a kierunek studiów Inżynieria Materiałowa prowadzony jest na wszystkich czołowych uczelniach technicznych w Polsce.

Od początku lat 80-tych ukazują się w Polsce dwa periodyki poświęcone nauce o materiałach i inżynierii materiałowej. Są to: kwartalnik *Archiwum Nauki o Materiałach* (wydawany przez Komitet Nauki o Materiałach PAN), oraz miesięcznik *Inżynieria Materiałowa* (Wyd. Sigma). Problematyka nauki o materiałach poruszana jest również w kwartalniku *Archives of Metallurgy* (wydawany przez Komitet Metalurgii PAN)

SŁOWNICZEK STU KLUCZOWYCH TERMINÓW

alotropia: polimorfizm, występowanie tego samego pierwiastka lub związku w dwóch lub więcej różnych postaciach krystalicznych; przemiana fazowa z jednej postaci w drugą zachodzi w określonych temperaturze i ciśnieniu

anizotropia: nieizotropowość; ciało jest anizotropowe gdy jego właściwości zależą od kierunku, cecha charakterystyczna dla ciał krystalicznych

amorficzność: bezpostaciowość; niekrystaliczność; układ przestrzenny atomów w amorf. ciele stałym nie wykazuje porządku dalekiego zasięgu

atom międzywęzłowy: atom zwykle dodatku stopowego lub zanieczyszczenia zajmujący w sieci krystalicznej położenie pomiędzy węzłami sieciowymi

ceramika: niemetaliczny, niepolimerowy materiał odznaczający się wysoką twardością, oraz odpornością cieplną i chemiczną

cząsteczka: skończony wymiarowo skoordynowany układ silnie wzajemnie związanych atomów. Wiązania między cząsteczkami są słabsze od wiązań występujących między tworzącymi je atomami

cząsteczkowy kryształ: kryształ w którym jednostki podstawowe są cząsteczkami, a nie atomami.

defekt: element mikrostruktury stanowiący zaburzenie regularności idealnego ułożenia atomów w kryształach; rozróżniamy defekty punktowe (☞ wakanse, ☞ atomy międzywęzłowe), defekty liniowe (☞ dyslokacje) lub defekty powierzchniowe (☞ granice ziarn)

dielektryk: materiał, który po umieszczeniu między dwiema elektrodami nie przewodzi prądu, izolator

domieszka: dodatek stopowy wprowadzony w bardzo małej ilości, zwykle wyrażanej w ☞ ppm, szczególnie w materiale półprzewodnikowym.

dyfrakcyjna analiza: metoda badania struktury krystalicznej przy pomocy dyfrakcji promieni rentgenowskich (promieni X), elektronów lub neutronów. Metody Dyfrakcyjne są przedmiotem wykładów na III i IV roku IM w P.W.

dyfuzja: przemieszczanie masy w obrębie fazy spowodowane ruchem atomów pod wpływem gradientów koncentracji składu chemicznego lub temperatury. Dyfuzja stanowi podstawowy mechanizm większości ☞ przemian fazowych. Przedmiot wykładu na II roku IM

dyslokacja: liniowy defekt struktury krystalicznej, którego przemieszczanie wywołuje przesunięcie się (☞ poślizg) o odstęp atomowy dwóch części kryształu względem siebie w określonej płaszczyźnie sieci krystalicznej; ruch dyslokacji stanowi podstawowy mechanizm ☞ odkształcenia plastycznego. Teoria Dyslokacji jest wykładana na II roku IM P.W.

elektrony walencyjne: elektrony pochodzące z zewnętrznej powłoki elektronowej atomu, które biorą udział w reakcjach chemicznych.

faza: jednorodny fizycznie i chemicznie obszar niejednorodnej materii obejmujący objętość znacznie większą niż objętość atomu lub cząsteczki, oddzielony od pozostałych obszarów granicami międzyfazowymi. W przypadku ciał stałych w zależności od sposobu ułożenia atomów w przestrzeni rozróżniamy fazy krystaliczne, amorficzne i cząsteczkowe.

fizyka ciała stałego: dziedzina fizyki zajmująca się wyjaśnieniem budowy i właściwości ciał stałych w oparciu o ich elektronową strukturę. Przedmiot wykładu na II roku studiów IM w P.W.

granica ziarn: defekt struktury krystalicznej stanowiący powierzchnię rozdzielającą dwa przylegające do siebie części kryształu o różnej orientacji sieci czyli ↻ ziarna; granice ziarn stanowią podstawowy element mikrostruktury ↻ polikryształów silnie wpływając na ich właściwości.

hartowanie: chłodzenie w wodzie lub oleju stali nagrzanej do odpowiednio wysokiej temperatury, przeprowadzone w celu wytworzenia w niej twardego ↻ martenzytu

inżynieria powierzchni: dział inżynierii materiałowej zajmujący się wytwarzaniem na materiałach warstw powierzchniowych o założonych właściwościach na drodze modyfikowania ich budowy fazowej poprzez zmianę składu chemicznego. Metody *inżynierii powierzchni* stosowane są do nadawania powierzchniom materiałów konstrukcyjnych specjalnych właściwości np odporności na ścieranie lub odporności korozyjnej, oraz przy tworzeniu funkcjonalnych struktur warstwowych. Warstwy tworzone są zwykle przez ich nanoszenie z par na drodze chemicznej (CVD) lub fizycznej (PVD). Przedmiot wykładu na IV roku IM.

izolator: = dielektryk

izotropia: ciało jest izotropowe gdy jego właściwości nie zależą od kierunku

kohezja: między atomowe siły przyciągające, dzięki którym ciało stałe zachowuje spójność

komórka elementarna: najmniejsza powtarzalna przestrzennie jednostka charakteryzująca przestrzenny układ atomów sieci kryształu

kompozyt: materiał zespolony z conajmniej dwu różnych, odrębnie występujących materiałów. Przedmiot wykładów na IV roku IM w P.W.

korozja: stopniowe niszczenie materiału w wyniku spowodowanych przez otoczenie reakcji chemicznych lub elektrochemicznych. O korozji i metodach ochrony mówi się w ramach wykładów na roku IV.

kruchość: tendencja materiału do niespodziewanego, nie poprzedzonego odkształceniem plastycznym pęknięcia. Pod wpływem dostatecznie wysokich naprężeń wszystkie materiały pękają, lecz te, które tą skłonnością mają większą od innych nazywamy kruchymi. Materiały kruche odznaczają się niską ↻ wiązkością

krystalizacja: proces w wyniku którego następuje rozrost fazy krystalicznej na drodze przyłączania kolejnych atomów do zarodka utworzonego w obszarze innej, zwykle ciekłej fazy

krystalit: = ziarno, element polikryształu

krystalografia: dyscyplina nauki zajmująca się opisem form i struktur kryształów, przedmiot wykładu na I roku studiów IM w P.W.

kryształ: ciało stałe w którym atomy (lub cząsteczki) rozmieszczone są w przestrzeni według powtarzalnego wzoru.

liczba koordynacyjna Z: liczba najbliższych, znajdujących się w jednakowych odległościach atomów otaczających każdy z atomów w danej sieci krystalicznej, największą koordynację mają sieci zwarcie upakowane dla których $z=12$.

magnetyczny materiał: materiały odznaczające się zdolnością do zagęszczania strumienia magnetycznego. Wyróżniamy materiały magnetycznie miękkie, które podlegają namagnesowaniu i rozmagnesowaniu przy niewielkich natężeniach pola magnetycznego (duża przenikalność magnetyczna i mała koercja, wąska pętla histerezy) oraz materiały magnetycznie twarde, przemagnesowujące się pod wpływem bardzo silnych pól.

makrocząsteczka: cząsteczka (molekuła) zbudowana z setek lub tysięcy atomów

martenzyt: nierównowagowa twarda faza będąca przesyconym roztworem węgla w niskotemperaturowej odmianie alotropowej żelaza, powstaje w wyniku ↻ hartowania stali

mer: najmniejsza powtarzalna jednostka układu atomów w polimerach

metal: materiał wykazujący wiązania metaliczne i dodatni współczynnik temperaturowy oporności

metalografia: dziedzina odnosząca się do badania i opisywania obserwowanej mikroskopowo mikrostruktury tworzyw metalicznych. Ponieważ metody m. stosuje się obecnie i do innych materiałów powinna ona nosić właściwie nazwę mikrografii

metalurgia: dziedzina wiedzy dotycząca otrzymywania metali z rud i surowców wtórnych oraz przetwarzania ich w użyteczne metale i stopy.

mieszanina: układ złożony z dwóch lub więcej faz

mikroskop elektronowy: przyrząd do badania mikrostruktury przypominający działaniem m. świetlny, ale zamiast światła wykorzystujący wiązkę przyśpieszonych elektronów. Rozróżniamy EM prześwietleniowe (TEM) i scanningowe (SEM)

mikroskop metalograficzny: mikroskop świetlny umożliwiający obserwacje odpowiednio przygotowanych powierzchni metali w świetle odbitym.

mikroskop polowy jonowy: przyrząd do obserwacji położenia atomów poprzez emisję zjonizowanych atomów z powierzchni ostrza w silnym polu elektrycznym

mikrostruktura: zespół cech, opisujący przestrzenne rozmieszczenie faz oraz występujących w obrębie tych faz lub między nimi wszelkiego rodzaju defektów budowy fazowej. O metodach optymalizacji mikrostruktury jest mowa w ramach wykładów na IV roku IM

molekuła: = cząsteczka

monokryształ: krystaliczna substancja w której, w przeciwieństwie do polikryształu cała objętość posiada jednakową orientację krystaliczną. M. niektórych substancji występują w naturze (np kamienie szlachetne), możemy też chodować je sztucznie przez krystalizację z jednego zarodka (np metodą Czochralskiego)

nadplastyczność: podatność materiałów do podlegania wielkim odkształceniom plastycznym pod wpływem niewielkich sił, charakterystyczna dla materiałów o bardzo małej wielkości ziarna, odkształcanych powoli w wysokiej temperaturze

nadprzewodnik: materiał, który po ochłodzeniu poniżej pewnej krytycznej temperatury nie wykazuje oporności elektrycznej

nieliniowe materiały: materiały o nieliniowej charakterystyce optycznej, to znaczy takie, w których niewielka zmiana intensywności padającej wiązki światła powoduje skokową zmianę mocy wiązki przechodzącej. Stanowią przedmiot zainteresowania ze względu na możliwość wykorzystania jako fotoniczne tranzystory.

obróbka cieplna: proces technologiczny w którym przedmiot metalowy zostaje poddawany cyklowi cieplnemu w celu zmiany jego mikrostruktury dla uzyskania odpowiednich właściwości. Technologia o.c. wykładana jest na IV roku

odkształcenie plastyczne: nieodwracalna zmiana kształtu ciała stałego prowadząca do zmiany sąsiedztwa atomów w wyniku ↻ poślizgu dyslokacji. Fizyczne aspekty odkształcenia plastycznego są wykładane na IV roku IM

odkształcenie sprężyste: odwracalna zmiana kształtu ciała stałego prowadząca do względnej zmiany położenia sąsiadujących atomów, która zanika po zdjęciu obciążenia

odlewnictwo: technologia kształtowania poprzez wypełnianie ciekłym metalem formy w której następuje jego krzepnięcie, silnie wpływa na mikrostrukturę. Technologia odlewania jest przedmiotem obieralnego wykładu na IV roku

osnowa: główna faza wielofazowego materiału w której są osadzone znajdujące się w mniejszych proporcjach inne fazy, zwykle umacniające materiał.

pełzanie: następujące z upływem czasu odkształcenie plastyczne materiału poddanego działaniu stałego obciążenia w wysokiej temperaturze. Wysoką odpornością na pełzanie muszą charakteryzować się materiały ↻ żarowytrzymałe.

pękanie: proces zniszczenia materiału w wyniku utraty jego spójności (dekohezja), zachodzi pod wpływem działania naprężeń i wywołany jest mikroskopowymi procesami zachodzącymi w ↻ mikrostrukturze, związanymi z inicjacją i rozwojem mikropęknięć. Rozróżniamy bardzo niebezpieczne pękanie kruche, charakterystyczne dla ↻ kruchych materiałów o niskiej ↻ wiązkości (szkło, cement), oraz pękanie ciągliwe, charakterystyczne dla materiałów plastycznych o dużej wiązkości, w czasie którego dekohezja jest poprzedzona makroskopowym odkształceniem plastycznym (większość stopów metali)

pierwiastek stopowy: celowo wprowadzony składnik stopu inny niż metal podstawowy

plastyczność: cecha materiału charakteryzująca jego podatność do trwałego odkształcenia bez pękania. Materiały plastyczne odznaczają się wysoką ↻ wiązkością

polikryształ: jednolity materiał zbudowany z wielu kryształów (ziarn) różniących się wzajemnie orientacją krystaliczną i dzięki temu zawierający granice ziarn. Polikryształy powstają w wyniku ↻ krystalizacji z wielu zarodków lub też na drodze ↻ spiekania.

polimer: materiał organiczny zbudowany z wielkich makrocząsteczek składających się z wielu powtarzalnych jednostek (merów). Nazywany również plastykiem. Rozróżniamy polimery termoplastyczne, które pod wpływem nagrzewania mięknią i łatwo poddają się formowaniu, a po ochłodzeniu ponownie stają się sztywne oraz polimery termoutwardzalne, które pod wpływem nagrzewania zwiększają swoją sztywność. Budowa polimerów jest przedmiotem wykładu na III roku

polimeryzacja: proces w wyniku którego następuje zwiększenie ilości merów przypadających na jedna makrocząsteczkę

polimorfizm: ↪ alotropia

półprzewodnik: niemetal, w którym pod wpływem wprowadzenia metalicznych ↪ domieszek uzyskuje się przewodność elektryczną pośrednią między przewodnikami a izolatorami. Półprzewodniki wykazują ujemny współczynnik temperaturowy oporności. Materiały półprzewodnikowe stanowią przedmiot obieralnych wykładów na III i IV roku

porządek bliski : układ charakteryzujący najbliższe otoczenie atomu

porządek daleki: regularny układ atomów rozciągający się na wiele odległości międzyatomowych

poślizg: przemieszczanie się względem siebie dwóch części kryształu wywołane ruchem ↪ dyslokacji po określonej płaszczyźnie w sieci krystalicznej, stanowiące elementarny proces odkształcenia plastycznego

ppm: *parts per million*, jednostka określająca zawartość do-mieszki lub zanieczyszczeń w materiale i wyrażona w stosunku do miliona jednostek składnika podstawowego; 1ppm = 0,0001%

przemiana fazowa: przejście materiału z jednej postaci fazowej do innej (związane np ze zmianą stanu skupienia lub postaci alotropowej) pod wpływem zmiany temperatury (lub ciśnienia). Przemiany fazowe wykorzystywane są m.inn. do kształtowania ↪ mikrostruktury materiałów. Przedmiot wykładu na III roku IM

przeróbka plastyczna: technologia kształtowania metali na drodze ↪ odkształcenia plastycznego, prowadzonego zwykle w wysokich temperaturach, silnie wpływająca na mikro-strukturę. Przedmiot wykładu obieralnego na IV roku IM.

rafinacja: proces metalurgiczny w wyniku którego zostają z metalu usunięte zanieczyszczenia pozostałe po redukcji

redukcja: proces w wyniku którego tlenki metalu zostają pozbawione tlenu, podstawowa reakcja w trakcie metalurgicznej ekstrakcji metali z ich rud, które zwykle są tlenkami

rekrytalizacja: proces zachodzący w odkształconym plastycznie metalu pod wpływem podwyższonej temperatury w wyniku którego następuje ↪ zarodkowanie nowych ziarn i ich rozrost w stanie stałym kosztem odkształconej osnowy, dzięki czemu mikrostruktura ulega zmianie i zostaje usunięte wywołane odkształceniem umocnienie

równowaga: stan w którym układ osiąga minimum energii właściwe dla danych warunków termodynamicznych w związku z czym nie wykazuje tendencji do zmian

roztwór stały: stopowa faza krystaliczna, której skład chemiczny może być zmieniany w określonym zakresie bez powodowania skokowej zmiany budowy fazowej czy właściwości, utworzona z sieci atomów rozpuszczalnika, w której rozmieszczone są statystycznie atomy składnika rozpuszczonego.

sieć krystaliczna: przestrzenny układ geometryczny charakteryzujący periodyczność układu atomów w kryształach

składnik: pierwiastek chemiczny potrzebny dla utworzenia cząsteczki, związku lub stopu

spawanie: technologia łączenia metali poprzez ich lokalne nadtopienie, mikrostruktura materiału w miejscu spawania (w spoinie) zostaje silnie zmieniona

spektroskopia: metoda polegająca na wytworzeniu widma i analizie jego składowych długości fal w celu określenia składu chemicznego lub poziomów energetycznych materiału

spiek: materiał otrzymana na drodze spiekania proszku

spiekanie: proces w wyniku którego pod wpływem temperatury następuje na drodze dyfuzji w stanie stałym trwałe zespolenie sproszkowanego materiału. Technologię spiekania stosujemy do nadawania kształtów elementom wykonywanym z bardzo twardych materiałów o wysokiej temperaturze topnienia.

sprężystość: podatność materiału do powrotu do wyjściowego kształtu po usunięciu obciążenia, bezpośrednio zależna od siły wiązań międzyatomowych

stal: techniczny stop żelaza z węglem i innymi składnikami, zawierający mniej niż 2% C i przerabialny plastycznie

stop: materiał metaliczny składający się z dwóch lub więcej pierwiastków (składników) z których co najmniej główny jest metalem. Stopy mogą być zbudowane z jednej fazy lub stanowić mieszaninę kilku faz stałych.

struktura: zespół cech charakteryzujący budowę materii na różnych szczeblach jej organizacji. Mówiąc o materiałach interesujemy się przede wszystkim strukturą krystaliczną tworzących je faz i mikrostrukturą

szkło: amorficzne ciało stałe, dawniej nazwa ta obejmowała tylko przezroczyste materiały tlenkowe

termodynamika stopów: dziedzina termodynamiki dotycząca energetycznej interpretacji budowy fazowej metali i ich stopów, przedmiot wykładu na III semestrze IM.

temperatura homologiczna: stosunek temperatury materiału do jego temperatury topnienia wyrażonych w skali bezwzględnej

temperatury wysokie: temperatury powyżej 0,4 temp. homologicznej, w których o zachowaniu materiałów zaczynają decydować procesy związane z dyfuzją.

trawienie: wytrawianie, ujawnianie cech mikrostruktury metalu lub stopu (budowy fazowej i ziarnistości) zwykle poprzez poddawanie wypolerowanej próbki działaniu odpowiednio dobranych odczynników chemicznych

twardość: cecha ciała stałego przejawiająca się odpornością na zadrapanie lub działanie nacisków lokalnych. Określana jest metodami np. Brinnela (HRB), Rockwela (HRC), Vickersa (HRV), różniącymi się rodzajem stosowanego wgłębnika (kulka, stożek, piramidka), wielkością przykładanego obciążenia, oraz metodą odczytu (wielkość nacisk, głębokość odcisku, przekątna odcisku)

tworzywo: = materiał

udarność: stosunek energii zaabsorbowanej podczas udarowego łamania próbki do jej poprzecznego przekroju. Zwykle określana metodą Charpy'ego przy pomocy specjalnego młota

umacnianie: wzrost wytrzymałości materiału spowodowany zmianami jego mikrostruktury pod wpływem obróbki cieplnej (np u. wydzieleniowe) lub odkształcenia plastycznego (u. odkształceniowe)

wakans: defekt struktury krystalicznej będący luką, miejscem w sieci w którym brakuje atomu. Termin ten może być również wykorzystywany dla rozpoznawania studentów PW i AGH, gdyż w Krakowie z nieznanymi bliżej powodów nazywają ten element mikrostruktury wakancją

wiązkość: podatność materiału do absorbowania energii na drodze odkształcenia plastycznego lub tworzenia nowych powierzchni swobodnych, charakteryzująca jego podatność do pęknięcia, materiały kruche posiadają bardzo małą wiązkowość

wydzielanie: przemiana fazowa w wyniku której z przesyconego roztworu stałego następuje wyodrębnienie przesycającego składnika w postaci drugiej fazy. Jedną z głównych metod umacniania stopów metali

wytrzymałość: zdolność materiału do przenoszenia obciążeń, zwykle charakteryzowana jako stosunek siły rozrywającej do przekroju poprzecznego próbki

wyżarzanie: zabieg obróbki cieplnej polegający na wytrzymaniu stopu w odpowiedniej temperaturze i powolnym ochłodzeniu w celu zbliżenia mikrostruktury do stanu równowagowego

zanieczyszczenie: niepożądany składnik materiału, którego nie udało się, lub nie było można usunąć na drodze rafinacji w procesie wytwarzania

zarodek: mała, trwała termodynamicznie grupa uporządkowanych atomów w cieczy lub w ciele stałym, która w wyniku przyłączania kolejnych atomów ulega rozrostowi doprowadzając do krystalizacji lub przemiany fazowej

zbrojące włókna: w kompozytach cienkie włókna o wysokim współczynnikiem sprężystości i wysokiej wytrzymałości (szklane, węglowe, ceramiczne lub metaliczne)

ziarno: jednorodny fazowo obszar w polikryształach, w którym zachowana jest jednorodna orientacja krystaliczna, różna od orientacji przyległych ziarn. Wielkość ziarna silnie wpływa na właściwości materiału. Ziarnistość mikrostruktury jest łatwa do zaobserwowania, nawet nieuzbrojonym okiem

związek międzymetaliczny: faza krystaliczna zbudowana z dwóch pierwiastków, z których co najmniej jeden jest metalem, występująca przy ich określonym stosunku atomowym i wykazująca przewagę wiązań metalicznych

żaroodporność: cecha charakteryzująca odporność stopów metalicznych na działanie agresywnego środowiska (zwykle utleniającego) w wysokich temperaturach

żarowytrzymałość: odporność materiału na pełzanie, wymagana od stopów przeznaczonych do pracy w temperaturach wysokich

LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

Encyklopedie:

Encyclopedia of Materials Science and Engineering. (red. M.B.Bever) Pergamon Press, Oxford, New York, tomy 1-8, 1986

Encyklopedia Techniki: Metalurgia; Wydawnictwo Śląsk, Katowice, 1985

Struktura Materii: przewodnik encyklopedyczny; PWN Warszawa 1982

Prace popularne:

R.Cotterill: The Cambridge Guide to the Material World, Cambridge University Press, Cambridge 1985

Science; tom 191 (1976) str 631-776; tom 208 (1980) str 775-966; tom 226 (1984) str 615-668 (specjalne numery poświęcone materiałom)

Istota i właściwości materiałów nowoczesnych. (wybór artykułów ze specjalnego numeru Scientific American, Sept. 1967), Wyd. PWN. 1970

Scientific American, October 1986 (specjalny numer poświęcony materiałom)

S.T.Jaźwiński, A.Ciszewski, T.Radomski, A.Szumner: Z zagadnień inżynierii materiałowej. Książka i Wiedza, 1977

J.W.Sawickij, W.S.Klaczko: Metale ery kosmicznej, Wyd.Śląsk, Katowice, 1984

A. Gierek: Niektóre problemy inżynierii materiałowej; Wyd. Politechnka Śląska, Gliwice 1990

B. Ciszewski, W. Przetakiewicz: Nowoczesne materiały w technice, Wyd. Bellona, Warszawa 1993

Historia:

E.Tyrkiel: Wykres żelazo-wegiel w rozwoju historycznym, Ossolineum, Wrocław 1966

C.S.Smith: A History of Metallography, University of Chicago Press, 1960

L.A.Aitchison: A History of Metals, Edward Arnold, London 1960

R.F.Mehl: The historical development of physical metallurgy, rozdział w Physical Metallurgy (red. R.W.Cahn, P.Haasen) tom I str 1, wyd 3, North-Holland 1983, ta niezwykle wartościowa książka jest również dostępna w tłumaczeniu rosyjskim.

S.P.Timoshenko: Historia wytrzymałości materiałów, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1966

Opracowania dotyczące perspektyw i znaczenia nauki o materiałach i inżynierii materiałowej:

Materials and Man's Needs; The Summary Report of the Committee on the Survey of Materials Science and Technology (COSMAT 74). US Academy of Science 1974

Materials Technology and Development, Fifth issue of the Advance Technology Alert System Bulletin, Centre for Science and Technology of the United Nations Secretariat, N.Y. 1988

Materials Science and Engineering for the 1990s; Maintaining Competitiveness in the Age of Materials, Report of the National Research Council (US), National Academy Press, Washington DC, 1989