

# 1. Wprowadzenie

Ustalanie zależności między strukturą, procesem technologicznym i własnościami użytkowymi, jak również dobór materiałów i procesów technologicznych kształtujących ich strukturę i własności w celu stosowania w złożonych systemach produkcyjnych, stanowią przedmiot głównych zainteresowań inżynierii materiałowej. Dobór właściwego materiału wraz z odpowiednim procesem technologicznym ma kluczowe znaczenie, zapewniając największą trwałość produktu przy najniższych kosztach.

Nauka o materiałach i inżynieria materiałowa znajdują się wśród tych dyscyplin nauki, od których w istotnej mierze zależeć będzie dalszy rozwój cywilizacyjny [49, 74, 84, 155, 179]. Jej rolą będzie sprostanie zapotrzebowaniu na nowoczesne materiały inżynierskie, uwzględniające obecne wymagania gospodarcze, w tym tendencje do zwiększania konkurencyjności w wytwarzaniu materiałów i produktów.

Szybki postęp wiedzy w wielu obszarach inżynierii wytwarzania stawia coraz większe wyzwania producentom i projektantom narzędzi. Oczywistym bowiem jest, że niezawodność, trwałość, jakość i inne cechy narzędzi, zapewniające komfort w ich eksploatacji zależą w głównej mierze od świadomego, przemyślanego doboru materiałów, z uwzględnieniem wielokryterialnej optymalizacji. Wśród wielu kryteriów, coraz większego znaczenia, oprócz wymagań konstrukcyjnych, technologicznych i eksploatacyjnych, nabierają także względy ekonomiczne oraz ekologiczne. W przypadku materiałów stosowanych na narzędzia skrawające decydującymi własnościami są twardość oraz ciągliwość. Zadanie doboru właściwego materiału przez projektanta narzędzi stanowi nieustający kompromis pomiędzy wyborem materiału o wysokiej twardości, lecz małej ciągliwości, lub odwrotnie – wybór materiału o dobrej ciągliwości, ale relatywnie mniejszej twardości. Wśród wielu stosowanych obecnie materiałów narzędziowych materiałami o najlepszej ciągliwości i odporności na pękanie są stale szybko tnące, które wydaje się, że jeszcze przez długi czas w wielu zastosowaniach pozostaną niezastąpione.

Ciągły intensywny rozwój materiałów narzędziowych i przemysłu narzędziowego, np. w takich krajach jak Włochy, Austria, Niemcy, Szwecja, Francja czy Słowenia, związany jest ze zmianami na rynku narzędzi i zaawansowanych materiałów narzędziowych. Ma to związek ze specyfiką współczesnego wytwarzania, wymuszoną tanią konkurencją rynków wschodnich, w porównaniu do sytuacji sprzed kilku, kilkunastu lat. Wciąż w odniesieniu do materiałów narzędziowych oczekuje się zapewnienia najlepszych z możliwych do osiągnięcia własności

użytkowych i eksploatacyjnych, a w szczególności trwałości (czasu eksploatacji) narzędzi, co wymusza konieczność prowadzenia badań nad nowymi materiałami. Niestety, klasyczne podejście wymaga dużych nakładów finansowych i czasu, oraz wiąże się z koniecznością przeprowadzenia kompleksowych badań podstawowych nowo projektowanych materiałów narzędziowych, technologii ich wytwarzania, technologii poprawiających ich własności oraz badań stosowanych, polegających na kompleksowych próbach technologicznych, pozwalających na ocenę własności użytkowych narzędzi.

Wymagania wieloaspektowego projektowania inżynierskiego narzędzi, jak również liczne światowe doniesienia literaturowe wskazują na potrzebę kompleksowego podejścia do zagadnienia doboru materiałów wraz z procesami technologicznymi na współczesne narzędzia, cechujące się wysoką jakością, niezawodnością i będące przyjazne dla środowiska [5, 30, 74, 84, 137].

Stale szybkołnące stanowiły przez kilkadziesiąt lat przedmiot zainteresowania środowiska naukowego, z którego wywodzi się autor. Prowadzone najpierw w Instytucie Metaloznawstwa, a następnie w Instytucie Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych (IMIiB) badania nad tymi materiałami dotyczyły wpływu m. in. obróbki cieplnej i ciepłomechanicznej na własności stali szybkołnących [1, 2, 73, 75], przemian fazowych [43, 65, 67], jak również możliwości substytucji niektórych dodatków stopowych [45, 57, 64, 66, 68, 69]. Liczne prace prowadzone we współpracy z kilkoma ośrodkami europejskimi dotyczą rozwoju metody PVD i jej zastosowaniu do pokrywania stali konwencjonalnych oraz spiekanych stali szybkołnących powłokami jedno- i wielowarstwowymi [32, 33, 34, 35, 37, 44], a obecnie również gradientowymi [38, 42, 61, 71, 117, 139]. W Instytucie prowadzone są także badania nad spiekаныmi stalami szybkołnącymi [47, 48, 140, 142, 143]. Efektem tych badań były liczne rozprawy doktorskie i habilitacyjne oraz opracowania monograficzne [4, 29, 39, 62, 63, 77, 93, 114, 134, 216], co stanowi istotny wkład naukowy w rozwój badań nad stalami szybkołnącymi nie tylko w kraju.

Równocześnie, istotny obszar zainteresowań naukowych IMIiB stanowi Komputerowa Nauka o Materiałach, która jest od kilkunastu lat przez ten Zespół kreowana w kraju. Główne osiągnięcia w zakresie zastosowań narzędzi informatycznych, w tym sztucznej inteligencji, zostały opublikowane m.in. w pracach [46, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 58, 59, 60, 129, 198, 199, 200, 201, 207, 208, 209, 210].

Tematyka podjętych w ramach pracy badań stanowi naturalny kierunek rozwoju obszarów badawczych realizowanych w IMIiB.

### 1.1. Stale szybko tnące i ich znaczenie

We współczesnej, nowoczesnej produkcji przemysłowej, a szczególnie w produkcji masowej, obróbka skrawaniem stanowi jeden z najważniejszych procesów kształtowania i wytwarzania produktów. Wymagania konkurencyjnej, łączącej wysoką jakość i wydajność produkcji w połączeniu z możliwie niskimi jednostkowymi kosztami, stwarzają potrzebę dysponowania wysokowydajnymi materiałami narzędziowymi [80].

W odniesieniu do materiałów stosowanych na kształtowe narzędzia skrawające, najistotniejszymi własnościami są twardość oraz odporność na uszkodzenia podczas eksploatacji np. pęknięcie lub złamanie, którą wyrazić można udarnością lub odpornością na pękanie materiału. To właśnie wysoka ciągliwość materiału predysponuje narzędzie do pracy w warunkach obciążeń uderowych, jak również w warunkach powodujących uszkodzenie zmęczeniowe. Zapewnienie tych oczekiwanych własności eksploatacyjnych uzyskuje się dla materiału o określonym składzie chemicznym podczas obróbki cieplnej.[31, 126, 166]

Wśród stosowanych obecnie podstawowych materiałów narzędziowych można wskazać trzy podstawowe grupy:

- stale szybko tnące,
- węgliki spiekane,
- materiały ceramiczne oraz materiały supertwarde (kompozyty na bazie aluminium, sialony, regularny azotek boru i diament syntetyczny).

Skład chemiczny i struktura współczesnych stali szybko tnących jest efektem prowadzonych przez dziesięciolecia badań eksperymentalnych. Przyjmuje się, że pierwszą stalą szybko tnącą była opracowana w 1900 roku przez F.W. Taylora i M. White'a stal zawierająca 1,85% C, 0,15% Si, 0,3% Mn, 3,8% Cr i 8,0% W. Prace nad rozwojem stali szybko tnących doprowadziły do wprowadzenia do stali dodatku wanadu, następnie wolframu w stężeniu ok. 18% oraz kobaltu. Kolejna modyfikacja składu chemicznego stali szybko tnących dotyczyła częściowego zastąpienie wolframu przez molibden. Dalsze badania eksperymentalne doprowadziły do równoczesnego zwiększenie stężenia wanadu i węgla, a następnie do zredukowania stężenia wolframu podwyższenia stężenia wanadu, co doprowadziło do opracowania nowego typu stali szybko tnących 12-0-4 o stężeniu wanadu 3÷5% i węgla ok. 1,6%. Wtedy też prowadzone badania wykazały, że węgliki typu MC,

tworzone w dużej części przez wanad, mają większą odporność na ścieranie od węglików typu  $M_6C$ . W efekcie pozwoliło to na opracowanie stali o dużym stężeniu węgla i wanadu, zwanych stalami "super-szybkotnącymi".[184]

W latach 1940-1952 w USA podjęto próby zastępowania wolframu molibdenem, a opracowana tam stal typu 6-5-2 jest obecnie jedną z najbardziej rozpowszechnionych stali szybkotnących [186].

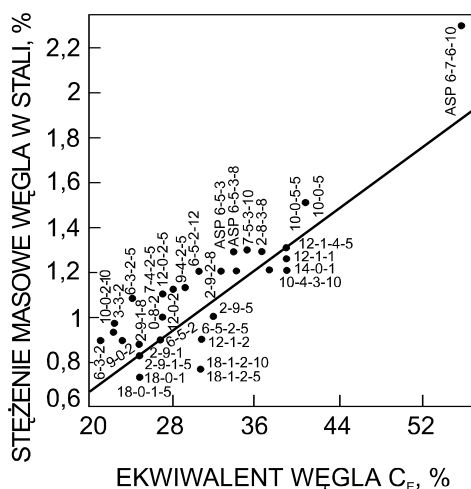
Tak więc ewolucja w składzie stali szybkotnących od ich powstania aż do końca II Wojny Światowej dokonała się metodą empiryzmu naukowego i wymagała przeprowadzania wielu prób eksperymentalnych, kończących się niejednokrotnie niepowodzeniem lub wręcz prowadzących do błędów.

Obecnie podstawowymi składnikami stopowymi w stalach szybkotnących są chrom, wolfram, wanad, a także molibden i kobalt. Oprócz wymienionych, podstawowych pierwiastków, jako dodatki stopowe niekiedy wprowadzane są krzem, niob i tytan. Systematyczne badania nad zależnością między składem chemicznym, procesami wytwarzania oraz obróbki cieplnej i własnościami stali szybkotnących podjęto dopiero w latach 60-tych ubiegłego wieku. W ich wyniku ustalono, że własności stali szybkotnących zależą istotnie od stosunku między stężeniem węgla, a sumarycznym stężeniem pierwiastków stopowych [13, 127]. Doprowadziło to do podania wzoru na tzw. wskaźnik ekwiwalentu węgla (rys. 1) [13, 127]:

$$C_E = \frac{\%W + 1,9\%Mo + 6,3\%V}{30} \quad (1)$$

gdzie: W, Mo, V – odpowiednio stężenie masowe tych pierwiastków w stali w %.

Wyniki badań [13, 127] pozwoliły ustalić, że najkorzystniej jest, ze względu na własności eksploatacyjne, aby stale z dodatkami wolframu, molibdenu i wanadu, zawierały o 0,1÷0,2% większe stężenie węgla od wartości wskaźnika ekwiwalentu węgla  $C_E$  (rys. 1). Podwyższenie stężenia węgla powyżej 0,2% od wartości wskaźnika ekwiwalentu węgla  $C_E$  spowodowało powstanie nowej grupy stali szybkotnących osiągających dużą twardość i większą odporność na odpuszczanie przy nie zmienionej ciągliwości, w porównaniu z gatunkami konwencjonalnymi [13, 14].



**Rys. 1.** Stężenie masowe węgla i pierwiastków stopowych w stalach szybko tnących różnych typów [39]

Na przełomie lat 70 i 80-tych ubiegłego wieku, w związku z trudnościami w pozyskaniu niektórych dodatków stopowych, zapoczątkowano szereg prac dotyczących ograniczenia stężenia w stalach szybko tnących bardzo drogie lub deficytowe wówczas pierwiastków takich jak wolfram, wanad, molibden i kobalt, poprzez zastąpienie ich innymi – tańszymi i łatwo dostępnymi pierwiastkami, w tym krzemem, aluminium, tytanem lub niobem [40, 43, 65, 77, 83, 91, 127, 185, 195, 213].

I tak w przypadku krzemu stwierdzono, że może on zastępować wolfram i molibden [9, 10, 11, 12, 43, 57, 65, 69, 70, 75, 77, 91, 167, 168, 169, 170, 195, 213], co zaowocowało opracowaniem nowych gatunków stali szybko tnących z podwyższonym stężeniem krzemu [68, 76, 77].

Badania [12, 17, 20, 41, 63, 64, 66, 67, 68, 69, 70, 99, 100, 102, 115, 122, 127, 160, 185, 216] wykazały, że celowe jest stosowanie niobu, dla częściowego zastąpienia nim wanadu.

Natomiast wyniki badań nad stalami szybko tnącymi z dodatkiem tytanu [45, 62, 63, 64, 66, 67, 83, 88, 176, 184] wskazują, że może on częściowo zastępować wanad. Ponadto prace [21, 22, 24, 119, 120, 121, 122, 180, 181, 182, 183] pozwoliły na opracowanie nieledeburtycznych stali szybko tnących, wykazujących brak segregacji węglików, przy innych właściwościach porównywalnych z konwencjonalnymi stalami szybko tnącymi.

Przedstawiony rozwój stali szybko tnących, w zakresie doskonalenia ich składu chemicznego oraz procesów wytwórczych, był niezwykle długotrwały i złożony.

Konwencjonalna produkcja stali szybko tnących składa się z procesów topienia, odlewania, obróbki plastycznej i obróbki cieplnej. Pierwszą metodą wytwarzania stali szybko tnących stosowaną głównie do odlewania małych wlewków był proces tyglowy. W połowie XX wieku został zastąpiony przez indukcyjne i łukowe piece elektryczne stosowane z dużym powodzeniem do dnia dzisiejszego. W latach 60-tych istotnym krokiem w metalurgii stali szybko tnących było pojawienie się procesów przetapiania elektrośluzowego i próżniowego przetapiania łukowego, które zapewniły podwyższenie czystości metalurgicznej stali szybko tnących i możliwość kontrolowania krystalizacji wytwarzanych produktów. Pierwiastki stopowe są dodawane w formie żelazostopów takich jak: żelazo-wolfram, żelazo-molibden, żelazo-wanad, które są podstawowymi pod względem udziałów masowych jak i cen, a ich udział uzależniony jest od stężenia węgla [108]. Za pomocą procesów *ESR* (*electroslag refining*) i *VAR* (*vacuum arc remelting*) oraz bardziej popularnego *electron beam* lub *plasma arc melting* osiągnąć jest większy stopień kontroli szybkości chłodzenia oraz związanej z tym lokalnej krystalizacji. Odmianą *ESR* jest *CESM* (*continuous electroslag melting*) nazywane także ciągłym elektrośluzowym topieniem [107, 108]. W tym przypadku elektroda ulegająca stopieniu, zastępowana jest wlewkami ze stali, podawanej w sposób ciągły do kadzi wraz z pierwiastkami stopowymi. Kolejną metodą gwarantującą zmniejszenie stopnia niejednorodności składu chemicznego i segregacji węglików pierwotnych jest rafinacja próżniowo-łukowa w procesie *VAD* (*vacuum arc depositions*). Stale szybko tnące wytworzone tą metodą, w porównaniu ze stalami wytopionymi konwencjonalnie, odznaczają się mniejszym stężeniem szkodliwych domieszek, zwłaszcza tlenu i siarki oraz wykazują po hartowaniu bardziej jednorodną wielkość ziarna austenitu pierwotnego. Metoda odlewania ciągłego nie znalazła zastosowania w przypadku wytwarzania stali szybko tnących z powodu trudności w otrzymaniu struktury wolnej od segregacji, związanej z szybkościami odlewania [108].

Wytwarzanie stali odlewanych pociąga za sobą konieczność stosowania obróbki plastycznej na gorąco, mającej za zadanie rozbicie komórkowej struktury lanej stali szybko tnącej z siatką węglików eutektycznych, poprzedzanej operacją wyżarzania ujednorodniającego. Tak więc znaczący wpływ na rozwój konwencjonalnych stali szybko tnących wywarły czynniki technologiczne, w tym przede wszystkim użycie kowarek do przekuwania stali szybko tnących [95, 96, 97]. Umożliwiają one uzyskanie korzystnej struktury

ry, przez praktyczną likwidację segregacji węglików pierwotnych, występującą przypadku zastosowania walcowania.

Począwszy od lat 70 -tych ubiegłego wieku rozwój stali szybko tnących i wytwarzanych z nich narzędzi następował w zakresie technologii ich wytwarzania, w tym zastosowanie do ich wytwarzania metod metalurgii proszków, obróbki cieplno-chemicznej i procesów PVD do pokrywania narzędzi z tych stali twardymi warstwami powierzchniowymi w celu polepszenia własności eksploatacyjnych, jak również rozwoju technologii obróbki cieplnej mniej uciążliwych dla środowiska od tradycyjnej wykorzystującej piece solne. Własności narzędzi ze stali szybko tnących ulegają wydatnej poprawie w wyniku zastosowania obróbki cieplno-chemicznej, w tym azotowania gazowego, azotowania jonizacyjnego, azotowania próżniowego i siarkoazotowania gazowego [1, 3, 81, 82, 124, 125, 177]. W Szwecji w 1970 r. została opracowana metoda wytwarzania spiekanych stali szybko tnących, znana jako proces ASEA-Stora [103]. W ostatnim dziesięcioleciu XX wieku, bardzo wiele prac badawczych i badawczo-wdrożeniowych dotyczy właśnie spiekanych stali szybko tnących, które nie wykazują kłopotliwej segregacji węglików pierwotnych przy gęstości zbliżonej do odpowiadającej stalom konwencjonalnym, oraz o własnościach użytkowych narzędzi, zwłaszcza o dużych przekrojach, lepszych od wykonywanych ze stali konwencjonalnych [42, 47, 48, 94, 104, 105, 117, 133, 140, 141, 142, 143, 152, 187, 188, 189, 190, 191, 194, 205, 206, 211, 212].

Przełomowe dla poprawy własności eksploatacyjnych narzędzi było wprowadzenie metody PVD - niskotemperaturowego fizycznego osadzania z fazy gazowej warstw powierzchniowych, złożonych z węglików i azotków tytanu, a także powłok wielowarstwowych. Pokrywane narzędzia wykazują nawet kilkakrotnie większą trwałość eksploatacyjną, od narzędzi wytwarzanych konwencjonalnie. Powłoki wytwarzane w procesie PVD można podzielić na proste (składające się z jednego materiału, metalu lub fazy) i złożone (składające się z więcej niż jednego materiału, przy czym materiały te zajmują różne pozycje w powłoce). Z powłok złożonych dodatkowo można wyróżnić powłoki wieloskładnikowe, wielowarstwowe, wielofazowe, kompozytowe i gradientowe. [15]

Prace nad wykorzystaniem tej nowoczesnej technologii, w tym również powłok złożonych (wieloskładnikowych, wielowarstwowych, wielofazowych, kompozytowych i gradientowych) do poprawy własności eksploatacyjnych narzędzi są intensywnie prowadzone w ostatnich kilkunastu latach i obszernie publikowane [4, 15, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 44, 56, 61, 71, 90, 93, 139, 175, 215].

Inne kierunki rozwoju i doskonalenia technologii obróbki cieplnej stali szybkołącznych, w tym uwzględniające aspekt ekologiczny [28], dotyczą zastosowania obróbki podzerowej w celu poprawienia głównie trwałości narzędzi [25, 87, 130, 151], obróbki cieplnej próżniowej [131, 132, 205], natryskiwania plazmowego będącego kombinacją metody PVD i metalurgii proszków [148] oraz stopowania powierzchni stali szybkołącznych [8, 106]. W pracy [7] przedstawiono interesujące wyniki badań wpływu kinetyki przemian fazowych przy nagrzewaniu ciągłym i wygrzewaniu izotermicznym na własności odpuszczanej stali, przy zastosowaniu tzw. odpuszczania wstępnego, co umożliwiła modyfikacje technologii obróbki cieplnej dotychczas stosowanych.

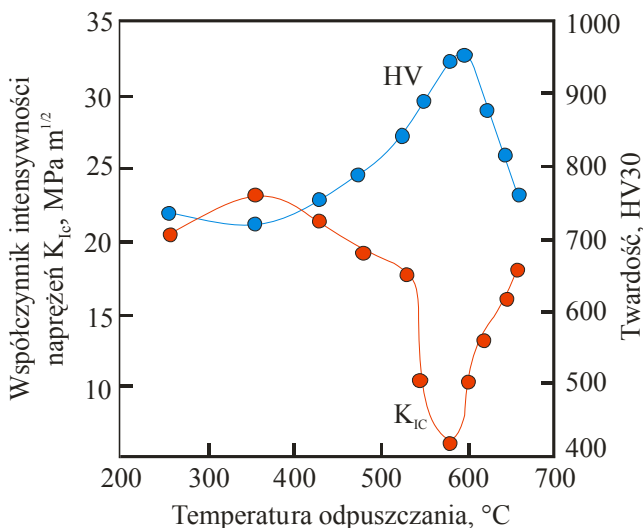
Struktura i własności stali szybkołącznych kształtowane są zarówno podczas ich wytwarzania jak i podczas obróbki cieplnej. Własności stali szybkołącznych w bardzo dużym stopniu zależą od ich struktury pierwotnej, utworzonej w wyniku krystalizacji. Sekwencja przemian podczas krystalizacji oraz skład fazowy węglików utworzonych w ich wyniku, zależą głównie od rodzaju i stężenia pierwiastków węglidotwórczych w stali, a także od sposobu chłodzenia [12, 39, 43, 77, 89, 92, 128, 185]. Obróbka cieplna stali szybkołącznych polega na hartowaniu i odpuszczaniu, początkowo wykonywana w kąpielach solnych, a obecnie w piecach próżniowych, komorowych z atmosferami regulowanymi, ze złożem fluidalnym, lub z zastosowaniem nagrzewania indukcyjnego [39]. Podczas hartowania stosuje się dwu- lub niekiedy trójstopniowe podgrzewanie narzędzi do temperatury austenitowania z wytrzymaniem w kąpielach solnych o temperaturze 550, 850 i ewentualnie 1150°C. Zapewnienie wysokiej hartowności i umożliwienie utwardzania wydzieleniowego podczas odpuszczania wymaga częściowego rozpuszczenia węglików pierwotnych w roztworze stałym i nasycenie austenitu węglem i pierwiastkami stopowymi. Uzyskuje się to poprzez zastosowanie wysokiej temperatury austenitowania, zwykle o ok. 50÷70°C niższej od temperatury solidusu i krótkiego czasu austenitowania, zwykle 80÷150 s [13, 39, 126].

Stopień nasycenia austenitu pierwiastkami stopowymi zależy także od wielkości węglików i ich rozmieszczenia w strukturze stali wyżarzonej sferoidyzująco. W odpowiednio dobranej temperaturze austenitowania część węglików przechodzi do roztworu stałego, a pozostała ich nierozpuszczona część hamuje nadmierny rozrost ziarn austenitu pierwotnego. Zbyt niska temperatura austenitowania nie zapewnia niezbędnego nasycenia austenitu węglem i pierwiastkami stopowymi, pochodzącymi z węglików rozpuszczonych w roztworze stałym i obniża twardość stali po odpuszczaniu. Z drugiej strony za wysoka temperatura



austenityzowania, jak i nadmierny czas grzania podczas hartowania, wpływają na zwiększenie udziału austenitu szcążkowego w stali a przez to na zmniejszenie jej twardości bezpośrednio po hartowaniu. Towarzyszy temu równocześnie zwiększenie odporności stali na pękanie oraz wzrost wielkości ziarna austenitu pierwotnego [39]. Przemiany zachodzące w stali szybkoctnącej podczas chłodzenia z temperatury austenitizowania można określić za pomocą wykresów czas-temperatura-przemiana przy chłodzeniu ciągłym CTPc lub wykresów  $\lambda$ Tpc przemian fazowych [126, 144, 145, 146].

Istotny wpływ na strukturę i własności stali szybkoctnących wywiera odpuszczanie. Przy odpuszczaniu w zakresie temperatury  $400\div 450^\circ\text{C}$ , w zależności od gatunku stali, w martenzycie następuje wydzielanie cementytu [39, 77]. Powoduje to poprawę własności wytrzymałościowych, jednakże zmniejsza się odporność stali na pękanie [156, 158]. Odpuszczanie w temperaturze  $500\div 580^\circ\text{C}$ , w związku z częściowym rozpuszczaniem się cementytu w martenzycie odpuszczonym, powoduje zmniejszenie wytrzymałości i współczynnika intensywności naprężeń  $K_{IC}$  będącego miarą odporności na pękanie [166] (rys. 2).



**Rys. 2.** Wpływ temperatury odpuszczania na wartość współczynnika intensywności naprężeń  $K_{IC}$  i twardość stali typu 6-5-2 [166]

Równocześnie następuje wydzielanie drobnych węglików stopowych, mających wpływ na efekt twardości wtórnej. W stalach zawierających powyżej 1% V za efekt twardości wtórnej

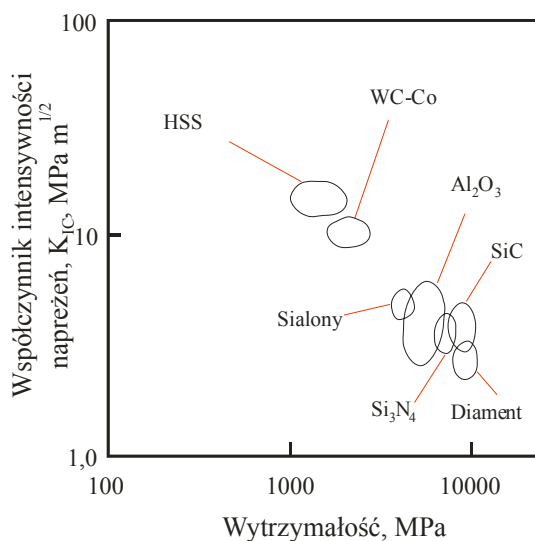
odpowiedzialne są wydzielenia węglików  $M_4C_3$  typu MC, wykazujące ściśle określone zależności krystalograficzne względem osnowy martenzytu odpuszczonego. Oprócz węglików typu  $M_4C_3$ , w stalach o małym stężeniu V (ok. 1%), w zakresie temperatury odpuszczania odpowiadającym twardości wtórnej, mogą wydzielać się również węgliki typu  $M_2C$ , a przy jeszcze mniejszych stężeniach tego pierwiastka węgliki typu  $M_{23}C_6$  i  $M_6C$ . [2, 13, 39, 72, 73]

Podczas odpuszczania, duży udział austenitu szczątkowego istotnie uwydatnia efekt twardości wtórnej w wyniku przemiany austenitu szczątkowego w martenzyt. Obecność martenzytu jest niezbędna do przebiegu procesu kondycjonowania austenitu szczątkowego podczas wygrzewania w temperaturze odpuszczania, w której następuje przygotowanie tej fazy do przemiany martenzytycznej, przebiegającej podczas chłodzenia z temperatury odpuszczania [72, 73]. Podczas wygrzewania w temperaturze odpuszczania, następuje dyfuzyjne wyrównanie stężenia węgla w austenicie szczątkowym, sąsiadującym z martenzytem zubożonym w węgiel, w wyniku wydzielenia się w martenzycie węglików stopowych. Wyższa temperatura początku przemiany martenzytycznej zubożonego w węgiel austenitu szczątkowego umożliwi przemianę martenzytyczną tej fazy podczas chłodzenia z temperatury odpuszczania [39, 72, 73, 172]. Przemiana martenzytyczna austenitu szczątkowego przebiega częściowo po odpuszczeniu już w temperaturze o  $50\div 100^\circ\text{C}$  niższej od temperatury zapewniającej maksymalną twardość wtórną [39]. Natomiast niemal cały austenit szczątkowy ulega przemianie w martenzyt podczas chłodzenia po odpuszczeniu w temperaturze niższej o  $20\div 30^\circ\text{C}$  od temperatury maksymalnej twardości wtórnej [39]. Zwykle odpuszczanie wykonuje się dwu- lub trzykrotnie. Strukturę składającą się niemal w całości z wysokoodpuszczonego martenzytu i węglików uzyskuje się dopiero po drugim, a w przypadku stali kobaltowych, nawet po trzecim odpuszczeniu.

Reasumując struktura stali szybkoznących po odpuszczeniu składa się z osnowy, węglików pierwotnych MC i  $M_6C$  (niekiedy również  $M_2C$ ), dyspersyjnych węglików wtórnych MC,  $M_2C$  i  $M_4C_3$ , oraz w szczególnych przypadkach z austenitu szczątkowego. Gruboziarniste węgliki typu MC i  $M_6C$  (wielkości rzędu mikrometrów) krystalizują bezpośrednio ze stanu ciekłego albo jako wydzielenia powstałe wspólnie z żelazem  $\gamma$  w wyniku reakcji eutektycznej i stąd nazywane są węglkami pierwotnymi. Spośród wszystkich składników strukturalnych właśnie te węgliki wykazują najwyższą twardość. Równocześnie mają one decydujący wpływ na odporności narzędzi na zużycie. W niektórych warunkach krystalizacji lub w przypadku gdy stal zawiera pierwiastki stopowe Mo i V, mogą także wydzielać się węgliki typu  $M_2C$ . Osnowę

stanowi martenzyt odpuszczony. Drobne (dyspersyjne) węgliki typu MC,  $M_2C$  i  $M_4C_3$  (wielkości rzędu kilkudziesięciu nanometrów), wydzielają się podczas odpuszczania. Wpływają one na efekt twardości wtórnej występujący w stalach szybko tnących i dlatego zwane są także węglnikami wtórnymi. Rozważając kolejność powstawania faz w strukturze, powstają one w końcowym etapie formowania się ostatecznej struktury stali szybko tnących. Różnorodność dodatków stopowych występujących w stalach szybko tnących (C, W, Mo, V, Si, Cr, Nb, Ti, Co) powoduje, że stanowią one niezwykle złożony system wielofazowy. Różnorodność przemian, fizyczne zależności decydują o tym, że ich badania strukturalne wymagają zastosowania najbardziej subtelnych metod badawczych stosowanych w inżynierii materiałowej.

Można było sądzić, że dynamiczny rozwój nowych materiałów ceramicznych, ceramiczno-węglkowe, węglików spiekanych, a także stosowanie technologii pokrywania tych materiałów w celu ograniczenia zużycia i wydłużenia czasu pracy narzędzi spowoduje stopniowe odchodzenie od stosowania stali szybko tnących [191]. Jednakże mała ciągliwość, jaką wykazują spiekane i ceramiczne materiały narzędziowe, powoduje, że nie stanowią one konkurencji dla stali szybko tnących, a obydwie te grupy materiałów należy uznać jako wzajemnie komplementarne (rys. 3).



**Rys.3.** Porównanie wytrzymałości i odporności na kruche pękanie dla materiałów stosowanych na narzędzia skrawające (dla stali oraz WC-Co podano granicę plastyczności, a dla pozostałych naprężenie ściskające) [149]

W przypadkach gdy szczególnie pożądaną własnością materiałów stosowanych na narzędzia skrawające jest duża ciągliwość, jak również dobra obrabialność w stanie zmiękczoneym, stale szybko tnące nadal pozostają materiałem dominującym.

Z pozycji użytkownika narzędzi najistotniejsza jest, obok trwałości, odporność narzędzia na uszkodzenia. W przypadku stali szybko tnących i występującego w nich efektu twardości wtórnej, sama twardość nie może być własnością decydującą o jakości materiału, bowiem stale szybko tnące o tej samej twardości, lecz różnej mikrostrukturze mogą posiadać różną odporność na pękanie [85, 116, 165, 166]. Fakt ten stał u podstaw szeregu badań mających na celu ustalenie zależności pomiędzy mikrostrukturą stali a jej odpornością na pękanie [132, 157, 162, 163, 165, 166, 196, 197]. Wyniki prac [161, 164] wskazują, że istotną rolę mogą odgrywać węgliki pierwotne, przy czym istotny jest nie tylko ich udział objętościowy w strukturze, ale również ich wielkość oraz rozmieszczenie w osnowie, wyrażone np. średnią odległością między nimi. Znaczenie wielkości węglików dla odporności stali na pękanie wydaje się być dyskusyjnym, gdyż panuje pogląd, iż węgliki o umownej średniej wielkości, równomiernie rozłożone w osnowie gwarantują najlepsze własności. Mechanizm propagacji pęknięć w stalach potwierdzony badaniami [132, 161, 164] wskazuje, że taka segregacja węglików nie tworzy bariery dla propagacji pęknięć, a uszkodzenie materiału postępuje niejednokrotnie wyłącznie na granicy fazowej węglík – osnowa. Tak więc można przypuszczać, że na zwiększenie odporności stali na pękanie korzystnie mogą wpływać duże węgliki, o rozmiarach większych od czosła propagującego pęknięcia (strefy odkształceń plastycznych). W przypadku, gdy pęknięcie napotyka na nie, stanowią swoistą barierę spowalniającą proces pękania. Kolejną fazą której przypisuje się wpływ na odporność na pękanie jest austenit szcążkowy. Wcześniej prace badawcze nad rozwojem stali szybko tnących miały m. in. na celu określenie parametrów obróbki zapewniającej minimalny udział austenitu szcążkowego w strukturze stali jako fazy niepożądaney. Jednakże wyniki badań [116, 163, 165, 196] wskazują, że austenit jako faza o wiele lepszych własnościach plastycznych niż martenzyt może poprawiać odporność stali na pękanie. Odrębnym zagadnieniem pozostaje kwestia wpływu jego rozłożenia w strukturze oraz metody stabilizacji na własności plastyczne stali [118]. Ściśle z tym wiążą się badania wpływu wielkości ziarna austenitu pierwotnego, zależnej od temperatury austenitowania [157].

W zakresie badań twardości wtórnej stali szybko tnących, dotyczących wpływu pierwiastków stopowych oraz parametrów obróbki cieplnej zagadnienie wydaje się być dosyć

dobrze zbadane a kompleksowa analiza została przedstawiona w pracach [29, 39, 62, 63, 114, 134, 216].

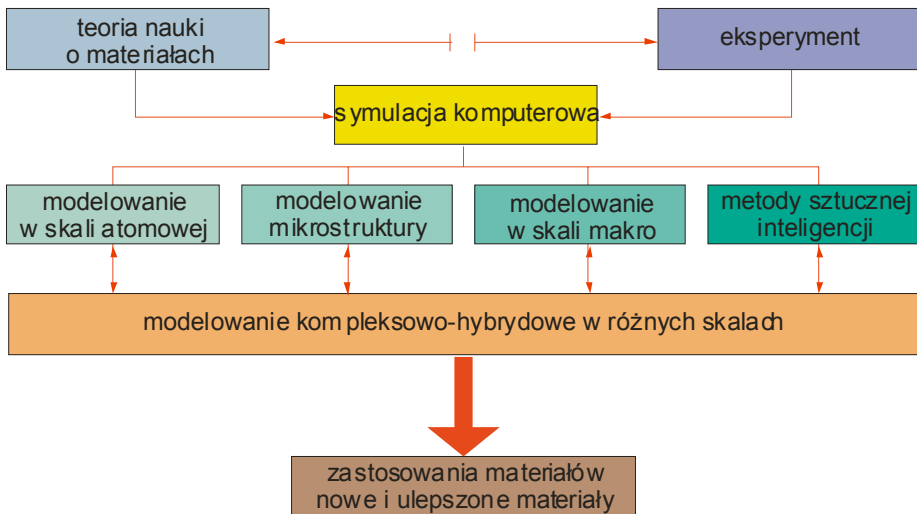
Nieliczne doniesienia literaturowe wskazują na próby opracowania alternatywnych metod obliczania odporności na pękanie stali, jak również innych materiałów metalowych [98, 101, 136, 132, 178]. Bazują one na wynikach badania współczynnika intensywności naprężeń  $K_{Ic}$  lub udarności. W przypadku modelowania twardości stali szybkotnących doniesienia literaturowe wskazują, że dotyczą one wyłącznie pojedynczych typów stali spiekanych [90, 135]. Natomiast w pracach własnych [93, 105] prowadzono badania nad opracowaniem modelu twardości stali szybkotnących dla możliwie szerokiej grupy gatunków tych stali. Jako narzędzia modelowania komputerowego stosowane są metody programowania genetycznego [98], sztuczne sieci neuronowe [101, 136], metody statystyczne [132, 178] oraz metoda elementów skończonych [193, 202, 203, 204].

### **1.2. Komputerowa Nauka o Materiałach i jej rola w projektowaniu nowych materiałów**

Postęp w obszarze inżynierii materiałowej jest nierozdzielnie związany ze stosowaniem i rozwojem metod modelowania matematycznego, metod numerycznych, metod inteligencji obliczeniowej i sztucznej inteligencji. Modelowanie i symulacja komputerowa umożliwiają poprawę własności materiałów inżynierskich oraz przewidywanie ich własności nawet przed wyprodukowaniem materiałów, przy znaczącym zmniejszeniu nakładów i czasu niezbędnych dla ich badania i wdrożenia. Modelowanie staje się więc nieodzownym narzędziem w nauce o materiałach i inżynierii materiałowej zapewniając chemiczny i fizyczny opis materiałów w szerokiej skali zarówno długości jak i czasu. Wiąże się to z koniecznością poznania zachowania materiałów w różnych skalach, od atomowej przez mezo- do skali makro, z wykorzystaniem znajomości zasad fizyki i chemii dotyczących stanu i własności materii stałej. W ten sposób współczesna nauka o materiałach a szczególnie projektowanie materiałowe, którego istotą jest symulacja komputerowa dla oceny własności materiałów w środowisku wirtualnym, umożliwia dostosowanie składu chemicznego i struktury do zbioru własności wymaganych dla nowych materiałów i produktów, przed wytworzeniem tych materiałów [5, 74, 154, 155].

Należy wyróżnić dwa aspekty projektowania materiałowego. Pierwszy, dotyczący

doboru materiału na określony produkt spośród opracowanych dotychczas i znanych już materiałów [5, 27, 30, 84, 137, 138] oraz drugi, związany z opracowaniem nowych materiałów do zastosowań dotychczas nieokreślonych lub materiałów lepiej spełniających wymagania użytkowe [59, 574, 147, 159, 171, 179]. W tym właśnie drugim aspekcie szczególnie ważne jest, aby do nowych rozwiązań materiałowych dochodzić nie metodą prób i błędów, lecz metodami modelowania matematycznego czy fizycznego, i przy wspomaganii komputerowym uzyskać rozwiązanie optymalne, bez konieczności prowadzenia czasochłonnej i kosztownych eksperymentów. Znajomość zjawisk - elektrycznych, magnetycznych, mechanicznych, cieplnych, strukturalnych lub innych, oraz dalsze ich umiejętne poznawanie przy uwzględnieniu teorii dotyczącej ich podstaw, z wykorzystaniem metod współczesnego modelowania (np. sztucznej inteligencji), technik analitycznych i zaawansowanych metod badawczych wyjaśniających zachowanie materiałów umożliwia projektowanie nowych materiałów o takich własnościach, które najlepiej spełniają wymagania praktycznego ich zastosowania (rys. 4). Przedstawione działania stanowią obszar zainteresowania nowej specjalności inżynierskiej – Komputerowej Nauki o Materiałach (ang. Computational Materials Science, Materials Informatics).



**Rys. 4.** Relacje pomiędzy teorią nauki o materiałach, symulacją komputerową i działaniami eksperymentalnymi [31]

W przypadkach gdy brak ogólnie przyjętej teorii dotyczącej zjawiska lub modelu go

opisującego, przydatne stają się metody odkrywania wiedzy (KDD) i eksploracji danych (data mining) w istniejących interdyscyplinarnych bazach danych [86]. Przykładem badań prowadzonych w tym zakresie na Wydziale Mechanicznym Technologicznym są prace z obszaru diagnostyki maszyn [19, 150]. Techniki te stanowią mogą niejednokrotnie niezastąpione narzędzie, pozwalające zintegrować informacje naukowe, np. w postaci wyników badań z istniejącą teorią w odkrywaniu nowych materiałów [109, 111, 112].

Wydaje się, że w przypadku takich dziedzin jak biologia, farmacja, astronomia, diagnostyka maszyn czy nauki społeczne, zastosowanie technik informatycznych jest stosunkowo zaawansowane. Natomiast w przypadku inżynierii materiałowej można uznać, że zastosowania szczególnie zaawansowanych technik informatycznych są w początkowej fazie. Można się doszukiwać przyczyny takiego stanu rzeczy w specyfice dziedziny jaką jest inżynieria materiałowa, gdzie dochodzenie do wyniku eksperymentu jest procesem długotrwałym i wymaga stosowania wielu wysublimowanych technik oraz wysokospecjalizowanej aparatury. W konsekwencji zasoby danych eksperymentalnych nie są aż tak obszerne, jak w przypadku innych dziedzin nauki i nadal pozostają w stosunkowo wysokim stopniu rozproszone. Obecnie za najbardziej usystematyzowane w tym zakresie należy uznać prace Ashby'ego wraz z zespołem [5, 6, 214]. Zaproponowane w tych pracach połączenie opracowanych zależności fenomenologicznych z dyskretnymi danymi zawartymi w katalogach materiałów zaowocowało opracowaniem modeli klasyfikacyjnych materiałów w postaci tzw. „map” przedstawiających wielowariantowo własności materiałów wg ujednoczonego schematu (rys. 5). Co istotne, po raz pierwszy zostały zestawione informacje typu struktura-własności dla materiałów odmiennych klas.

Podkreślając niepodważalną wartość tego podejścia, należy jednak wskazać na pewne jego ograniczenia, w tym w zakresie predykcji, zarówno wewnątrz przestrzeni opracowanych map, jak i poza tym obszarem. Nie da się bowiem swobodnie ekstrapolować własności materiałów jednej klasy na drugą (materiałów różnych klas np. ceramiki, stali) bez uwzględnienia szeregu ograniczeń, np. technologii wytwarzania lub poszczególnych własności np. gęstości.

Podstawowym zadaniem Komputerowej Nauki o Materiałach jest zagadnienie integracji wiedzy materiałoznawczej oraz narzędzi informatycznych (rys. 6) dla odkrywania nowych, niepoznanych dotychczas zależności oraz budowania modeli materiałowych w oparciu o tę wiedzę, która została na przestrzeni wielu lat pozyskana w wyniku badań eksperymentalnych.





Badania w obszarze modelowania matematycznego, inteligencji obliczeniowej i sztucznej inteligencji wskazują na duże możliwości związane z zastosowaniem modeli hybrydowych [78]. Łączenie metod w jednym modelu umożliwia rozważenie szerszego obszaru problemowego a co ważniejsze, wykorzystanie zalet każdej metody i uzyskanie efektu synergicznego. Podstawą powstania takich rozwiązań jest założenie, że metody te są w stosunku do siebie komplementarne.

Przy zastosowaniu narzędzi komputerowych, w tym symulacji komputerowej, możliwe jest rozwiązywanie zadań dwóch klas:

- Prosty (analizy), gdzie dokonuje się prognozowania własności materiałów w zależności od ich składu chemicznego, struktury oraz stanu przetworzenia;
- Odwrotnych (syntezy), gdzie następuje zdefiniowanie składu materiału oraz stanu jego przetworzenia, które zapewniają osiągnięcia pożądaných przez użytkownika, lub projektanta jego właściwości.

W przeważającej liczbie przypadków zagadnienia projektowania nowych materiałów stanowią zadania odwrotne, gdzie niejednokrotnie konieczne jest opracowanie nowego materiału wykazującego zespół wielu własności mechanicznych, użytkowych, ekonomicznych lub ekologicznych. W tym przypadku możliwa jest realizacja tych zadań w oparciu o istniejące zasoby danych eksperymentalnych i przy wykorzystaniu narzędzi sztucznej inteligencji

W strategiach hybrydowych stosowane są systemy złożone ze sztucznych sieci neuronowych i metody elementów skończonych. Cechują się one różnymi stopniami integracji, które wynikają z rodzaju prowadzonej analizy i są stosowane do rozwiązywania różnego rodzaju zadań. Interesującym podejściem do budowy systemów hybrydowych jest połączenie metody elementów skończonych i algorytmów ewolucyjnych. [16]

Sztuczne sieci neuronowe są również często kojarzone z innymi metodami inteligencji obliczeniowej i metodami statystycznymi. Połączenie sztucznych sieci neuronowych z jedną z metod optymalizacji, bazującej na przykład na algorytmach genetycznych umożliwia utworzenie bardzo wielu algorytmów dedykowanych do rozwiązania konkretnego problemu.

Zalety metod hybrydowych wykorzystujących elementy inteligencji obliczeniowej od dawna wykorzystywane w wielu dziedzinach nauki w Polsce wydają się być niedostrzegane w obszarze inżynierii materiałowej.