

1. Wprowadzenie

Wyzwania stojące przed współczesną gospodarką wskazują na konieczność zmniejszenia energo- i materiałochłonności jako na warunek zrównoważonego wzrostu i racjonalnego gospodarowania nieodnawialnymi zasobami naturalnymi. W większości przypadków cele te można osiągnąć poprzez zastąpienie tradycyjnie stosowanych tworzyw materiałami nowej generacji o większej wytrzymałości właściwej lub lepszych właściwościach funkcjonalnych. Uwzględniają one, już na etapie projektowania, specyficzne wielofunkcyjne wymagania konstrukcyjne. Innymi słowy: to materiał dostosowywany jest do konstrukcji, a nie konstrukcja do materiału. Podejście takie wymaga oparcia produkcji materiałów na wiedzy o nich, a jednocześnie wymusza elastyczne i umiejętne stosowanie skojarzenia wielu operacji technologicznych przy ich wytwarzaniu, aby uzyskać zamierzony efekt w postaci materiału posiadającego właściwości niezbędne do optymalnej pracy projektowanej konstrukcji.

Efektom tradycyjnych metod wytwarzania i przetwarzania materiałów metalicznych jest najczęściej uzyskanie polikrystalicznej struktury tych materiałów o rozmiarze ziaren od kilku mikrometrów do kilkunastu centymetrów. Tak szeroki zakres wymiarów ziaren implikuje stosowanie pojęć mikrostruktury i makrostruktury do opisu budowy materiałów. Podział ten wypływa z metod obserwacji charakterystycznych elementów budowy polikryształów, jakimi są ziarna. O ile do opisu struktury materiałów gruboziarnistych wystarczająca jest obserwacja odpowiednio przygotowanych preparatów nieuzbrojonym okiem (obserwacja makro), o tyle badania morfologii, rozmiarów i rozkładów ziaren z przedziału od kilku do kilkuset mikrometrów wymaga posługiwania się mikroskopami, a obserwowane ziarna zalicza się do mikronowej (mikrometrycznej) klasy rozmiaru. Warto zauważyć, że dolny zakres rozmiarów ziaren w tej klasie zbliżony jest do zdolności rozdzielczej mikroskopii świetlnej i wyznacza dolny kres obserwacji cech ziaren o rozmiarach mikronowych (mikrometrycznych). Badanie struktur zbudowanych z ziaren mniejszych rozmiarów wymaga zastosowania mikroskopii elektronowej.

W ciągu ostatnich dziesięcioleci szybko rozwija się nauka i technologia koncentrująca się na zjawiskach w skali nanometrów. Umownie przyjęto, że wartością graniczną w nanometrycznej skali jest wymiar około 100 nm. Materiały, których rozmiar ziaren jest mniejszy, noszą powszechnie akceptowaną nazwę nanomateriałów lub materiałów o strukturze nanometrycznej. Powstała luka w skali wymiarowej ziaren niekiedy była nazywana obszarem ultradrobnoziarnistych materiałów lub mezoskalą wymiarową, w rozumieniu pośredniej skali pomiędzy obszarem nanometrycznych ziaren a ziarnami mikronowymi (mikro-

metrycznymi). Badania elementów struktury w tak rozumianych skalach nanometrycznej i mezoskali wymaga podobnego instrumentarium, zasadniczo odmiennego od wymagań skali mikrometrycznej, dlatego wydaje się uzasadnione operowanie pojęciem skali submikronowej (submikrometrycznej), jako skali obejmującej zarówno zakres nanometrycznych rozmiarów ziaren, jak i przedział rozmiarów ziaren od 100 nm do 1 μm . Jak to zostanie wykazane w dalszej części pracy (rozdział 4), taki podział skal wymiarowych usuwa niedogodność związaną z arbitralnym określeniem górnej granicy nanometrycznej skali ziaren, która w odniesieniu do materiałów konstrukcyjnych nie jest wartością ustaloną.

Naturalną rezerwą wzrostu wytrzymałości materiału, bez pogarszania odporności na korozję i bez degradacji własności plastycznych (odporności na pękanie), jest silne rozdrobnienie ziaren polikryształów do rozmiarów mniejszych niż mikrometr. Na taką możliwość wskazuje znana relacja Halla–Pecha, chociaż jej siła wyraźnie maleje w wypadku submikronowych ziaren. Niektóre dane literaturowe wskazują nawet na maksimum wytrzymałości dla pewnego charakterystycznego rozmiaru ziarna z tego zakresu. Dalsze rozdrabnianie ziaren, poniżej wspomnianego rozmiaru, obniża wytrzymałość materiału [1]. Wartości maksymalne wytrzymałości odbiegają niewiele od teoretycznej wartości naprężenia płynięcia szacowanej na $G/30$ (G – moduł sprężystości poprzecznej) [2]. Jednocześnie silne rozdrobnienie ziaren oprócz wzrostu wytrzymałości prowadzi w pewnych zakresach temperatur i prędkości odkształcenia do wzmożonej plastyczności, a niekiedy do nadplastyczności, umożliwiając tym samym stosunkowo łatwe formowanie plastyczne takich tworzyw [3].

Nieliczne dane literaturowe wskazują, że w nieobrabilnych cieplnie stopach aluminium można zwiększyć maksymalne wartości własności wytrzymałościowych do ok. 60% wartości wytrzymałości teoretycznej przy zachowaniu niezmiennych własności plastycznych poprzez rozdrobnienie ziaren do rozmiarów poniżej jednego mikrometra [4, 5], a wprowadzenie niektórych dodatków stopowych zwiększa stabilność ich struktury i poprawia istotnie własności w podwyższonych temperaturach. Materiały takie mają konkurencyjne właściwości mechaniczne w porównaniu z konwencjonalnymi stopami obrabianymi cieplnie przy znacznie lepszej plastyczności, większej stabilności temperaturowej i odporności na korozję.

Dotychczas opracowano kilkanaście metod wytwarzania materiałów metalicznych o silnie rozdrobnionych ziarnach. Przykładem jest sposób wytwarzania nadeutektycznych siluminów AlSi26Ni8 o hybrydowej strukturze składającej się z 2÷3-mikrometrowych kryształów pierwotnego krzemu otoczonych przez ziarna eutektyki Al-Si o rozmiarze poniżej mikrometra (200÷300 nm) stabilizowanych znaczną ilością nanometrycznych (~30 nm) cząstek faz międzymetalicznych [6–9]. W tym przypadku rozdrobnienie ziarna uzyskuje się w procesie szybkiego krzepnięcia w wyniku modyfikacji przechłodzeniowej wymuszonej prędkością chłodzenia ze stanu ciekłego, mieszczącej się w przedziale $10^4\text{--}10^7$ K/s. Efekt taki występuje, między innymi, przy produkcji proszków metodą rozpylania ciekłego metalu. Zastosowanie konsolidacji plastycznej otrzymanych proszków pozwala uzyskać materiał lity o pomijalnie małej porowatości i rozmiarze kryształitów (ziaren) odziedziczonym z proszku wyjściowego.

Zastosowanie tej lub innych metod modyfikacji struktury zmierzającej do rozdrobnienia ziarna wydaje się obiecującym sposobem poprawy właściwości użytkowych materiałów metalicznych. Wymaga to jednak nowego spojrzenia na technologię wytwarzania

takich materiałów, ponieważ wydaje się, że tradycyjne metody stosowane dotychczas w metalurgii, zwłaszcza metali nieżelaznych, wyczerpały swoje możliwości w tym względzie. Dotyczy to szczególnie materiałów na osnowie aluminium, którego naturalne właściwości, jakimi są mała gęstość, łatwość kształtowania i duża odporność na korozję atmosferyczną, powodują olbrzymie zainteresowanie nimi jako materiałami konstrukcyjnymi i użytkowymi w wielu dziedzinach gospodarki. Jednocześnie wiedza o zachowaniu się materiałów o ziarnie mniejszym niż mikrometr wciąż ma wiele luk, a materiały na osnowie aluminium o takiej strukturze nadal traktowane są jako nowość techniczna. Upowszechnienie wiedzy o ich właściwościach i sposobach wytwarzania wydaje się jednym z istotnych zadań i wyzwań stojących przed inżynierią materiałową.

Książka jest przeznaczona dla specjalistów z dziedziny inżynierii materiałowej oraz przetwórstwa aluminium. Adresowana jest do profesjonalistów oraz tych, którzy chcieliby uzupełnić swoją wiedzę bez konieczności selekcjonowania natłoku informacji naukowych i technicznych, niekiedy ważnych, ale równie często o charakterze przyczynków. Zamierzaniem autora jest przybliżenie niektórych zagadnień z obszaru inżynierii materiałowej tym, którzy koncentrują się raczej na sposobach wytwarzania półproduktów z metali lekkich, oraz niektórych problemów technologii przetwórstwa metali tym, którzy swoją karierę związali raczej z nauką o materiałach. W głębokim przekonaniu autora dopiero połączenie wiedzy z tych dwu obszarów, uzupełnione trzeźwą i racjonalną analizą rynku i kosztów, daje nadzieję, że intelektualna aktywność inżynierów i praktyków przyniesie pożądane efekty.

Wytwarzanie materiałów, w tym również zaawansowanych materiałów metalicznych, nie skupia dzisiaj na sobie uwagi masowej publiczności. Ta część aktywności naukowej i przemysłowej najczęściej znajduje się w medialnym tle dla spektakularnych osiągnięć „modnych” obszarów techniki. Nie może to jednak oznaczać zgody na marginalizację w świadomości społecznej znaczenia fundamentalnych dla całej cywilizacji dziedzin wytwórczości, takich jak produkcja materiałów. Tym bardziej nie może oznaczać zaniechania wzbogacania i upowszechniania wiedzy o materiałach i sposobach ich wytwarzania, bez względu na to jak mało efektywnymi, w odbiorze społecznym, dziedzinami są metalurgia i inżynieria materiałowa. Takim, między innymi, celom ma służyć prezentowana monografia.

W ostatnich latach podejmowano w Polsce i Europie wiele projektów badawczych koncentrujących się na specjalnych metodach wytwarzania materiałów i stopów aluminiowych o silnie rozdrobnionych ziarnach. W niektórych z nich osobisty udział miał autor niniejszej monografii. Rezultaty tych badań pozostają w dużej mierze rozproszone w wielu publikacjach i opracowaniach specjalistycznych. Część z nich, niezauważana i pomijana, zasługuje jednak na uwagę. Daje się odczuć brak całościowego spojrzenia na zagadnienia mogące stanowić pomost pomiędzy wiedzą specjalistyczną z inżynierii materiałowej i jej aplikacją do praktyki technicznej i technologicznej. Celem autora jest próba zebrania w jednym opracowaniu publikowanych i niepublikowanych informacji na temat teoretycznych przesłanek rozdrobnienia ziaren do rozmiarów submikronowych i skutków tych zmian, technologii wytwarzania oraz właściwości takich materiałów. Szczególny nacisk zostanie położony na te metody, które można szybko aplikować do warunków przemysłowych, zachowując jednocześnie ekonomiczną opłacalność ich stosowania.