

„*The hotter the engine, the better*”. Tak brzmi tytuł artykułu prof. Perepezko (University of Wisconsin-Madison) opublikowanego w magazynie Nature w listopadzie 2009 roku. Od momentu publikacji artykułu minęło prawie równo dziesięć lat, a jego motto przewodnie jest wciąż bardzo aktualne. Ogólny trend wzrostu temperatury pracy urządzeń związanych z produkcją energii (zwłaszcza lądowych i lotniczych turbin gazowych) jest wciąż kontynuowany i na pewno zostanie utrzymany również w przyszłości. Wynika to z jednoznacznie pozytywnej zależności pomiędzy temperaturą pracy, a wydajnością silników turbogazowych. W praktyce, wyższa wydajność oznacza dłuższy dystans lotu przy niższym zużyciu paliwa i mniejszym zanieczyszczeniu powietrza. Można zatem powiedzieć również „*im gorętszy silnik, tym bardziej przyjazny dla środowiska*”. Dlatego też, biorąc pod uwagę globalne problemy związane zarówno z ograniczoną dostępnością paliw kopalnych, jak i postępującą degradacją środowiska, dzisiejsze urządzenia energetyczne powinny być tak „gorące”, jak to tylko możliwe.

W ostatnich dziesięcioleciach wykonano duży krok w kierunku rozwoju nowej generacji żarowytrzymałych nadstopów na bazie niklu, które pozwoliły na stały wzrost temperatur pracy. Niemniej jednak, wydaje się, że w tej chwili materiały te osiągnęły swoje maksymalne możliwości, a ze względu na wartości ich temperatury topnienia oraz niedostateczną wytrzymałość mechaniczną w wysokiej temperaturze, ich stosowalność ograniczona jest do  $T_{max} \sim 1150^{\circ}\text{C}$ . Jednakże, uwzględniając fakt, iż dalszy wzrost temperatury pracy do  $1300^{\circ}\text{C}$  pozwoliłby uzyskać ponad 50% wzrost mocy wyjściowej turbiny, można śmiało stwierdzić, że opracowanie nowych materiałów wysokotemperaturowych jest warte każdego wysiłku.

Wdrożenie materiałów, które byłyby w stanie działać ponad aktualnym reżimem temperaturowym nadstopów, wymaga zastosowania nowych rozwiązań w projektowaniu technologii materiałów. W tym względzie, szczególną uwagę zwraca się na koncepcję stopów wieloskładnikowych uzyskanych w wyniku zmieszania ze sobą metali wysokotopliwych (takich jak Mo, Nb, Ta czy W) w prawie równych proporcjach. Tego rodzaju materiały, o temperaturze topnienia powyżej  $2000^{\circ}\text{C}$ , w literaturze funkcjonują pod nazwami: wysokotopliwe stopy o wysokiej entropii (RHAЕ) lub wysokotopliwe złożone stopy skoncentrowane (RCCA). Dotychczas udokumentowano, że w wielu przypadkach wykazują one właściwości mechaniczne na bardzo wysokim poziomie (całkowicie nieosiągalnym dla „klasycznych” nadstopów) nawet w temperaturze tak wysokiej jak  $1600^{\circ}\text{C}$ . Jednakże, aby możliwe RHAЕ lub RCCA mogły skutecznie zastąpić nadstopy oraz rozszerzyć zakres ich temperaturowej przydatności, konieczne jest wyeliminowanie ich następujących wad: (i) niskiej odporności na utlenianie w pośredniej temperaturze (poniżej  $900^{\circ}\text{C}$ ) oraz (ii) znacznie wyższej gęstości ( $\sim 13-14$  vs.  $8-9 \text{ g/cm}^3$ ) w porównaniu do stopów niklu.

W naszym Projekcie proponujemy przewyżczyć powyższe ograniczenia, wprowadzając nową klasę lekkich materiałów ultrawysokotemperaturowych, które łączą koncepcję RCCA z odpornymi na utlenianie wysokowytrzymałymi intermetalikami zawierającymi krzem (krzemki), bor (borki) i/lub krzem-bor (borokrzemki). W naszym założeniu, nowe materiały będą wykazywać następujące zalety w stosunku do nadstopów niklu i „konwencjonalnych” stopów wysokotopliwych: (i) stosunkowo niską gęstość ( $6-7 \text{ g/cm}^3$ ); (ii) poprawioną odporność na utlenianie (do  $1600^{\circ}\text{C}$ ) dzięki tworzeniu ciągłej warstwy powierzchniowej szkła borokrzemowego; (iii) doskonałą strukturalną stabilność termiczną zapewnioną przez wysoką entropię konfiguracyjną poszczególnych faz oraz (iv) zwiększoną wytrzymałość w wysokiej temperaturze dzięki umocnieniu supertwardymi borkami i borokrzemkami o wysokiej entropii. Ponadto naszym celem technologicznym jest opracowanie nowej metody wytwarzania, która pozwoliłaby uzyskiwać w/w materiały w warunkach niższej temperatury/ciśnienia niż proponowane w literaturze dla podobnych materiałów, a także bez użycia toksycznych substancji chemicznych jako aktywatorów reakcji.

Aby osiągnąć cel Projektu, powołany zostanie zespół badawczy złożony z Łukasiewicz - Krakowskiego Instytutu Technologicznego oraz Wojskowej Akademii Technicznej. Zespół projektowy opracuje dwustopniowy proces wytwarzania proponowanych materiałów, a następnie podda charakteryzacji ich strukturę oraz właściwości użytkowe. Efektem będzie ustanowienie podstawowej relacji proces/struktura/właściwości oraz wskazanie szeregu wytycznych do wielkoskalowego wytwarzania tego typu materiałów.

Wierzimy, że nowe materiały uzyskane według zaproponowanego przez nas podejścia technologicznego, będą cechować się wysokim potencjałem aplikacyjnym (zarówno w postaci powłok ochronnych jak i materiałów objętościowych) w zastosowaniach ultrawysokotemperaturowych, w tym jako oprzyrządowanie pieców przemysłowych, elementy aparatury laboratoryjnej czy układów mikroelektronicznych.