

# Technologie nanostrukturyzacji stali

Nanostrukturyzacja to proces powodujący silne rozdrobnienie ziaren w materiałach polikrystalicznych do skali nanometrycznej. Zabieg ten ma na celu poprawę właściwości mechanicznych materiału. W ramach projektu „NanoStal” opracowane zostały technologie umożliwiające wytworzenie nanostruktury w stalach poprzez zastosowanie obróbki cieplnej.

Nanostruktura powstaje w całej objętości elementu stalowego dzięki przemianom fazowym, co prowadzi do osiągnięcia wysokich parametrów wytrzymałościowych przy zachowaniu dobrych właściwości plastycznych. Otrzymane właściwości dorównują, a w niektórych przypadkach przewyższają nawet właściwości wysokostopowych stali *Maraging*, których cena jest aż 30-krotnie wyższa niż konwencjonalnych stali nisko- lub średniostopowych.

## Technologia izotermicznego hartowania bainitycznego

Podstawą opracowanych w projekcie „NanoStal” technologii jest izotermiczne hartowanie bainityczne, zastępujące klasyczną obróbkę cieplną (hartowanie i odpuszczanie). Poprzez precyzyjne dobranie parametrów procesu, w wybranych stalach otrzymano bezwęglkowy bainit o strukturze nanokrystalicznej (tzw. nanobainit). Nanobainit składa się z naprzemiennie ułożonych cienkich warstw austenitu i ferrytu o odmiennych właściwościach. Taki skład fazowy i morfologia zapewniają wiele unikatowych właściwości. Plastyczna faza austenityczna zapewnia odpowiednią udarność, odporność na kruche pękanie oraz duże wydłużenie przy zerwaniu. Przesycony węglem ferryt bainityczny oraz duża gęstość granic międzykrystalicznych wynikająca z nanometrycznych lub submikronowych rozmiarów ziaren prowadzi do uzyskania dużej twardości i wytrzymałości. Dodatkowo stale nanobainityczne cechuje bardzo dobra odporność na ścieranie oraz małe odkształcenia hartownicze. W zależności od konkretnych wymagań opracowano szereg oryginalnych technologii obróbki cieplnej bazujących na hartowaniu izotermicznym takich jak: B-Q & P (*Bainite Quenching & Partitioning*), UFG TRIP (*Ultra-Fine*



*Grained Transformation Induced Plasticity*), czy nanostrukturyzacja warstw nawęglanych. Powstały też gotowe rozwiązania dla konkretnych zastosowań takich, jak wytworzenie nanostruktur bainitycznych w stalach łożyskowych i w stalach sprężynowych.

## Technologie opracowane w ramach projektu „NanoStal”

Podstawowa technologia nanostrukturyzacji zapewnia osiągnięcie kompromisu między wytrzymałością i plastycznością. Dla przykładu, w stali narzędziowej X37CrMoV5-1 otrzymano maksymalną wytrzymałość na rozciąganie ( $R_m$ ) na poziomie 1860 MPa przy wydłużeniu 16%. Wadą tej technologii może być jednak długi czas procesu.

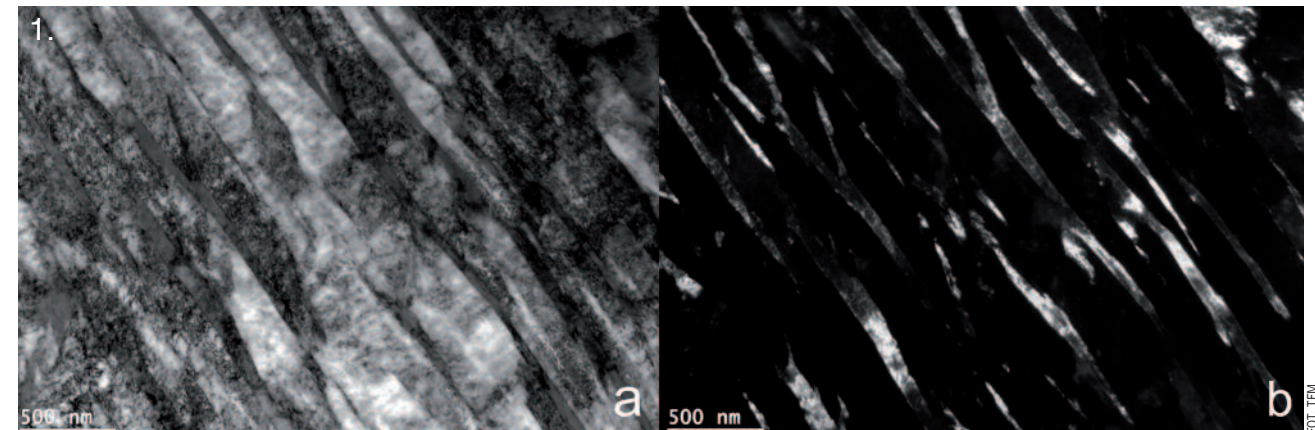
Technologia B-Q & P polega na połączeniu dwóch obróbek: izotermicznego hartowania bainitycznego (B) oraz hartowania i partycjonowania (Q & P), co pozwala na uzyskanie ultradrobnoziarnistych, wielofazowych mikrostruktur zapewniających wysokie właściwości wytrzymałościowe. Co więcej odpowiednie połączenie tych obróbek cieplnych eliminuje ich indywidualne wady, takie jak długi czas procesu i nadmierną wielkość ziaren. Umożliwia także dokładne sterowanie końcowym składem fazowym, dzięki czemu istnieje możliwość dostosowania właściwości wyrobu pod konkretne zastosowanie. Przykładowo dla stali 65SiWMn7-4-3 można uzyskać wytrzymałość na rozciąganie ok. 2300 MPa przy wydłużeniu 8%.

Technologia UFG TRIP pozwala wytworzyć jednorodną, wielofazową mikrostrukturu

o nanometrycznej lub submikronowej wielkości ziaren. Powstała w ten sposób mikrostruktura jest zbliżona do tej, jaką wytwarza się w typowych stalach typu TRIP znajdujących coraz szersze zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym. Do charakterystycznych właściwości stali TRIP można zaliczyć dużą zdolność absorpcji energii w trakcie zderzenia oraz dużą podatność na formowanie, przy zachowaniu wysokich parametrów wytrzymałościowych. Pozwala to zwiększyć bezpieczeństwo pasażerów podczas kolizji pojazdu oraz ograniczyć emisję CO<sub>2</sub> poprzez redukcję masy pojazdu w wyniku zastosowania elementów o mniejszych przekrojach. Technologia UFG TRIP wyróżnia możliwość uzyskania wysokich parametrów wytrzymałościowych i plastycznych bez obróbki plastycznej (obróbka cieplną można przeprowadzić na gotowych elementach) – por. tabela. Technologia ta może być zastosowana dla większej gamy gatunków stali, dzięki czemu możliwe jest uzyskanie wysokich i optymalnych właściwości mechanicznych.

W ramach projektu prowadzone były również badania nad wytworzeniem nanostruktury w warstwach wierzchnich stali nawęglanych. Badania przeprowadzone na nawęglonej powierzchniowo stali 38CrAlMo6-10 pozwoliły zaprojektować kilka wariantów alternatywnej obróbki, prowadzącej do wytworzenia w warstwie wierzchniej nanobainitu składającego się z naprzemiennie ułożonych płytek ferrytu bainitycznego i austenitu resztkowego o grubości w zakresie 40÷400 nm. Mikrostruktura rdzenia, w zależności od obróbki składała się z odpuszczonego martenzytu, bainitu dolnego lub mieszaniny obydwu składników strukturalnych. Uzyskanie takiej mikrostruktury w nawęglanej stali pozwala nie tylko na zmniejszenie bądź całkowite wyeliminowanie takich wad hartowniczych, jak: duży poziom naprężeń własnych w warstwie powierzchniowej, odkształcenie hartownicze elementu, a nawet zarodkowania pęknięć. Pozwala również na polepszenie właściwości powierzchni. Badania porównawcze otrzymanych warstw z próbkami nawęglonymi po konwencjonalnym hartowaniu i odpuszczaniu wykazały, że nanobainit, mimo niższej lub podobnej twardości w porównaniu do odpuszczonego martenzytu, charakteryzuje się nawet kilkukrotnie wyższą odpornością na zużycie ścierne. Jednocześnie zachowana jest dobra plastyczność rdzenia.

## PRZYKŁADOWE MIKROSTRUKTURY OTRZYMANE W STALACH PO ZASTOSOWANIU OPRACOWANYCH TECHNOLOGII



1. Mikrostruktura stali 30CrMnSiNi2A po hartowaniu izotermicznym: a. w jasnym polu; b. w ciemnym polu.

2. Struktura nanokompozytowa w stali łożyskowej.

3. Mikrostruktura stali 35CrSiMn5-5-4 po zastosowaniu technologii UFG TRIP.

Uzyskane wyniki wskazują, że opracowana obróbka cieplna może stanowić korzystną alternatywę dla hartowania i odpuszczania nawęglanych detali narażonych na zużycie ścierne, co pozwala na znaczące wydłużenie czasu ich eksploatacji.

Badania nad stalami łożyskowymi, a konkretnie stalą 100CrMnSi6-4 wykazały, że materiał ten o strukturze nanobainitycznej posiada dwukrotnie wyższą odporność na zużycie przez tarcie w porównaniu do materiału po hartowaniu i odpuszczaniu (badania przeprowadzone przy obciążeniu 400 MPa). Wykazano ponadto, że stal łożyskowa poddana procesowi nanostrukturyzacji według opracowanej w Projekcie technologii, posiada również wyższą powierzchnię trwałość zmęczeniową.

## Zalety opracowanych technologii

■ Hartowanie z przystankiem izotermicznym w zakresie tworzenia nanobainitu to pierwsza, wydajna i tania technologia, która może być wykorzystana do nanostrukturyzacji dużych, gotowych elementów stalowych.

■ Dzięki zastosowaniu opracowanych w projekcie technologii nanostrukturyzacji stali za pomocą obróbki cieplnej możliwe jest osiągnięcie lepszych właściwości mechanicznych w porównaniu do ulepszenia cieplnego. Odpowiednie zaprojektowanie procesu technologicznego dla konkretnych zastosowań pozwala na osiągnięcie optymalnych rezultatów.

■ Opracowane procesy nanostrukturyzacji mogą być realizowane przy wykorzystaniu istniejących urządzeń technologicznych do obróbki cieplnej.

■ Technologia nanostrukturyzacji stali zapewnia mniejsze odkształcenia hartownicze niż te, które występują w trakcie hartowania martenzytycznego w konwencjonalnym procesie ulepszenia cieplnego. Wynika to z mniejszego szoku temperaturowego przy hartowa-

niu, jak i mniejszych naprężeń związanych z tworzeniem nanostruktury w porównaniu do przemiany martenzytycznej.

Zespół projektu NanoStal

Projekt strukturalny „Wytwarzanie stali o strukturze nanokrystalicznej przy wykorzystaniu przemian fazowych” (*NanoStal*), realizowany jest w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, lata 2009 – 2014 i współfinansowany z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego. Więcej informacji: [www.nanostal.eu](http://www.nanostal.eu).

## KONTAKT

**Politechnika Warszawska**  
Wydział Inżynierii Materiałowej  
ul. Wołoska 141, 02-507 Warszawa  
tel. +48 22 234 81 03  
e-mail: [wieslaw.swiatnicki@nanostal.eu](mailto:wieslaw.swiatnicki@nanostal.eu)

## WŁAŚCIWOŚCI STALI 35CrSiMn5-5-4 PO ZASTOSOWANIU TECHNOLOGII UFG TRIP

Twardość	Granica plastyczności	Granica wytrzymałości	Wydłużenie całkowite	Udarność	Współczynnik	Współczynnik formowalności
HV2	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	[%]	[J]	$R_{p0,2}/R_m$	[MPa%]
313	556	901	21,6	74	0,62	19462