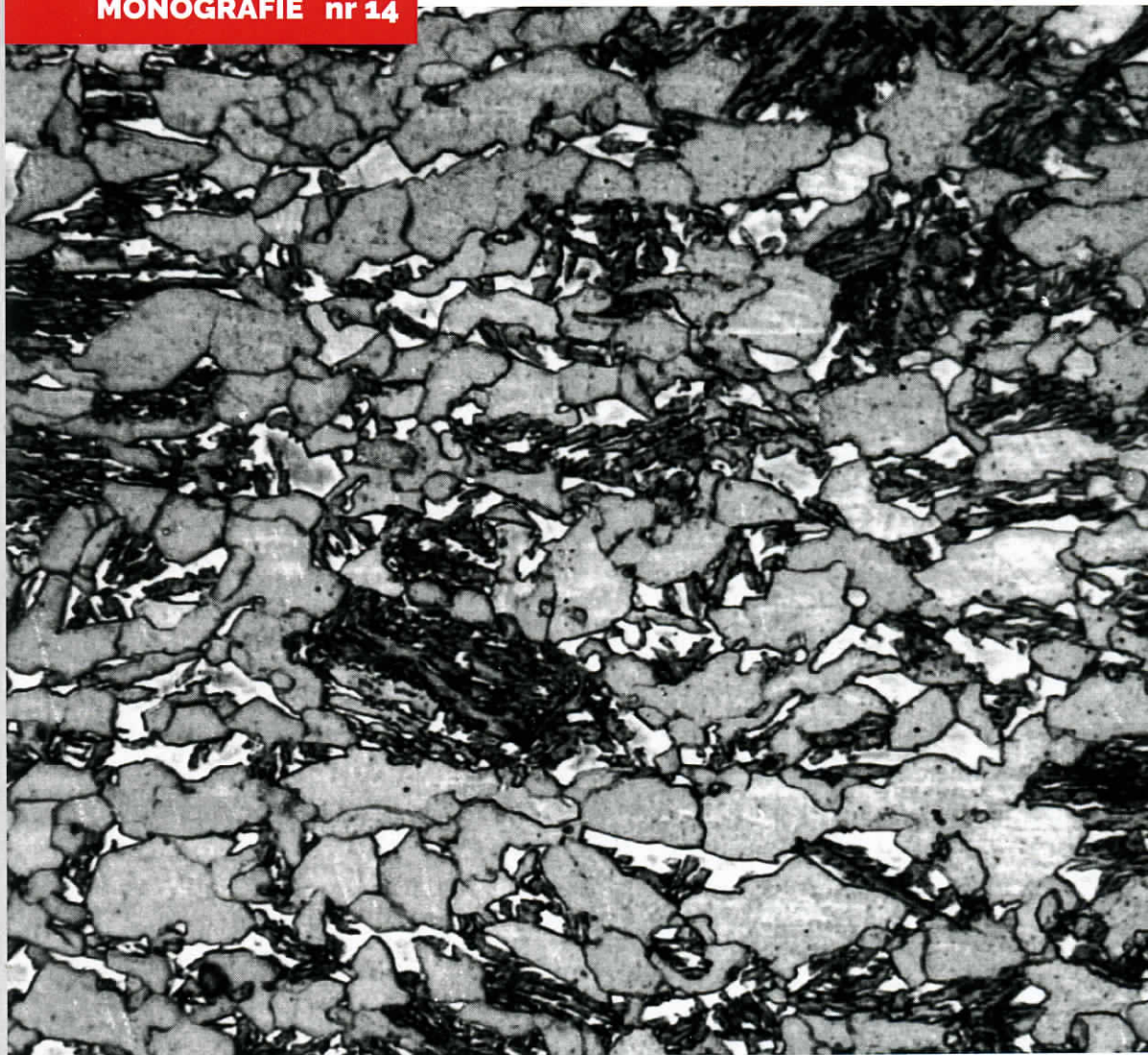


Adam Grajcar

**INŻYNIERIA WYSOKOWYTRZYMAŁYCH  
STALI WIELOFAZOWYCH**

**MONOGRAFIE nr 14**



Sieć Badawcza  
ŁUKASIEWICZ  
Instytut  
Metalurgii Żelaza



## **RECENZENCI**

Prof. dr Tadeusz BOŁD

Prof. dr hab. inż. Jan PILARCZYK

## **RADA NAUKOWA SERII MONOGRAFIE**

Prof. dr hab. inż. Leszek BLACHA

Prof. dr hab. inż. Włodzimierz DERDA

Prof. dr hab. inż. Henryk DYJA, M. dr h.c.

Prof. dr hab. Roman KUZIĄK

Prof. dr hab. inż. Andrzej ŁĘDZKI

Prof. dr hab. inż. Kazimierz MAMRO

Publikacja wspierana w ramach rektorskiego grantu profesorskiego.  
Politechnika Śląska, 10/010/RGP18/0251

**ISBN: 978-83-938130-6-3**

Wydawca: Sieć Badawcza ŁUKASIEWICZ

Instytut Metalurgii Żelaza im. Stanisława Staszica

ul. K. Miarki 12-14, 44-100 Gliwice

## **ZESPÓŁ REDAKCYJNY**

redaktor naczelny – dr hab. inż. Adam ZIELIŃSKI, prof. IMŻ

zastępca redaktora naczelnego – prof. dr hab. Józef PADUCH

redaktorzy tematyczni – dr hab. inż. Janusz DOBRZAŃSKI, prof. IMŻ,

prof. dr hab. Roman KUZIĄK, dr hab. inż. Marian NIESLER, prof. IMŻ,

dr hab. inż. Krzysztof RADWAŃSKI, prof. IMŻ, dr Grażyna STANKIEWICZ

redaktorzy językowi – mgr Maja KAMIŃSKA, mgr Anna STĘPIEŃ

redaktor techniczny – mgr inż. Danuta GRUSZCZYŃSKA

sekretarz redakcji – mgr Małgorzata SKALMIERSKA

Ark. wyd. 13,5

---

Skład i łamanie: IMŻ

Druk: D&D Sp. z o.o. – Gliwice, tel. 32 230 84 24

## Spis treści

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW .....	7
1. WPROWADZENIE .....	11
2. STALE WYSOKOWYTRZYMAŁE A MOTORYZACJA .....	15
Literatura do rozdziału 2. ....	29
3. CHARAKTERYSTYKA I PODZIAŁ STALI WIELOFAZOWYCH. ....	31
3.1. Stale ferrytyczno-martenzytyczne .....	35
3.2. Stale ferrytyczno-bainityczne. ....	38
3.3. Stale wielofazowe z austenitem szczałtkowym .....	41
3.4. Stale wielofazowe umacniane wydzieleniowo .....	45
3.5. Stale bainityczne z austenitem szczałtkowym .....	47
3.6. Stale martenzytyczne z austenitem szczałtkowym .....	49
3.7. Stale średniomanganowe .....	50
Literatura do rozdziału 3. ....	55
4. BADANIA ODKSZTAŁCALNOŚCI NA GORĄCO .....	61
4.1. Próby ściskania ciągłego. ....	62
4.2. Wyznaczanie kinetyki rekrytalizacji austenitu. ....	66
4.3. Symulacja fizyczna walcowania na gorąco blach taśmowych. ...	70
Literatura do rozdziału 4. ....	80
5. BADANIA PRZEMIAN FAZOWYCH PODCZAS CHŁODZENIA .....	83
5.1. Stabilność termodynamiczna austenitu .....	83
5.2. Strategie obróbki cieplnej dla stali wielofazowych .....	86
5.3. Przemiany fazowe w stalach średniomanganowych .....	89
Literatura do rozdziału 5. ....	99

<b>6. BADANIA EWOLUCJI MIKROSTRUKTUR STALI WIELOFAZOWYCH PODCZAS ODKSZTAŁCENIA</b> .....	103
6.1. Rozwój mikrostruktury stali średniomanganowej .....	103
6.2. Wpływ temperatury na rozwój mikrostruktury i własności stali	118
6.2.1. Ewolucja mikrostruktury stali o osnowie ferrytycznej....	118
6.2.2. Ewolucja mikrostruktury stali średniomanganowej .....	138
Literatura do rozdziału 6. ....	150
<b>7. BADANIA SPAWALNOŚCI STALI WIELOFAZOWYCH</b> ....	155
7.1. Spawalność stalowych blach karoseryjnych .....	155
7.2. Spawalność stali typu DP .....	161
7.3. Spawalność stali typu TRIP .....	172
7.4. Spawalność stali typu CP.....	182
Literatura do rozdziału 7. ....	190
<b>8. PODSUMOWANIE</b> .....	193
<b>STRESZCZENIE</b> .....	197



## 1. WPROWADZENIE

Koncepcja wysokowytrzymałych stali niskostopowych (HSLA – High Strength Low Alloy) na dobre została wdrożona do przemysłu światowego. Z pewnym opóźnieniem stale te zostały także z powodzeniem wdrożone w przemyśle krajowym, chociaż wiele jest jeszcze do zrobienia, szczególnie w zakresie przyspieszenia dynamiki wprowadzania nowych stali do przemysłu. Nadzieję na poprawę kondycji polskiego sektora stalowego należy wiązać z uruchomionym w roku 2016 programem sektorowym „Innostal”, który z pewnością przyczyni się do bardziej efektywnego transferu technologii z ośrodków badawczo-rozwojowych i akademickich do gospodarki. Efektywne wykorzystanie stali wysokowytrzymałych jako materiału konstrukcyjnego dla budownictwa, przemysłu maszynowego, górnictwa, okrętownictwa, energetyki, transportu i innych branż przemysłu pozwala na budowę i eksploatację nowoczesnych konstrukcji oraz maszyn i urządzeń o ograniczonej masie, a tym samym posiadających dużą wytrzymałość właściwą. Zasadnicze znaczenie dla uzyskania wysokiej wytrzymałości elementów konstrukcyjnych eksploatowanych w zróżnicowanych warunkach naprężeniowo-temperaturowych ma ich umocnienie realizowane na drodze rozdrobnienia mikrostruktury oraz utwardzania wydzieleniowego z udziałem dyspersyjnych cząstek węglikoazotków Nb, Ti, V, a czasem B i N. Prace naukowo-badawcze w tym zakresie obecnie koncentrują się na dalszym podniesieniu poziomu wytrzymałości, głównie poprzez wytwarzanie struktur ultradrobnoziarnistych, przy jednoczesnym ograniczeniu spadku plastyczności stali.

Redukcja masy elementów konstrukcyjnych w przypadku środków transportu drogowego i szynowego, a także morskiego i innych w wyniku zastosowania stali HSLA przenosi się bezpośrednio na mniejsze zużycie paliwa do napędu oraz ograniczenie emisji spalin do otoczenia. W szerszym kontekście produkcja wysokojakościowej stali oznacza mniejsze zużycie materiałów wsadowych w procesie wytwarzania surówki i procesie stalowniczym, co ma istotne znaczenie dla środowiska naturalnego.

W ostatnim trzydziestoleciu powstało wiele opracowań dotyczących zależności pomiędzy parametrami procesu wytwórczego – w tym obróbki plastycznej, cieplnej oraz cieplno-plastycznej – a mikrostrukturą i własnościami mechanicznymi oraz technologicznymi w stalach HSLA. Jednym z głównych „oredowników” stali mikrostopowych w Polsce był prof. Jan Adamczyk z Politechniki Śląskiej, który w roku 2000 w monografii pt. „Inżynieria wyrobów stalowych” podsumował główne aspekty poznawcze związane z metaloznawstwem stali HSLA, a także stalami odpornymi na korozję i stopami żarowytrzymałymi. W roku 2004 w swojej dwuczęściowej monografii pt. „Inżynieria materiałów metalowych” rozbudował pewne zagadnienia związane z inżynierią wytwarzania stali, a także poszerzył o zagadnienia inżynierii stopów metali nieżelaznych. Autor niniejszej monografii ma niejako na celu kontynu-

ować cykl związany z inżynierią wytwarzania nowoczesnych stali wysokowytrzymałych, oddając w ręce Czytelnika monografię pt. „Inżynieria wysokowytrzymałych stali wielofazowych”.

Wysokowytrzymałe stale wielofazowe znajdują zastosowanie głównie w przemyśle motoryzacyjnym na elementy struktury nośnej pojazdów. W ostatnich latach obserwuje się wyraźny trend zastępowania miękkich stali głębokotłocznych oraz stali HSLA stalami AHSS (Advanced High Strength Steel). Stale AHSS należą do grupy stali wielofazowych, a ich cechą charakterystyczną jest połączenie wysokiej wytrzymałości i plastyczności. Pierwsza cecha decyduje głównie o możliwości zastępowania stali miękkich, a cecha druga o zastępowaniu stali HSLA, w których trudno jest uzyskać dużą plastyczność taśmy stalowej przy wysokim poziomie wytrzymałości. Główną przeszkodą jest tutaj malejący potencjał stali na umocnienie odkształceniowe, szczególnie w zakresie dużych odkształceń. Stale AHSS bazują na koncepcji składu wielofazowego, w którym korzystne połączenie wysokiej wytrzymałości i plastyczności gwarantowane jest przez zapewnienie dużej szybkości umocnienia odkształceniowego, także w zakresie dużych odkształceń plastycznych. Cecha ta wynika z oddziaływania miękkich i twardych składników strukturalnych (podobnie jak w materiałach kompozytowych), przy czym niepożądanym składnikiem strukturalnym w tych stalach jest perlit. Wytwarzanie blach taśmowych ze stali wielofazowych umożliwi produkcję lekkich komponentów o ograniczonej grubości oraz o skomplikowanym kształcie, jaki charakteryzuje nowoczesne pojazdy.

Problematyka wyznaczania zależności pomiędzy parametrami procesów wytwórczych, mikrostrukturą i własnościami mechanicznymi oraz technologicznymi stali wielofazowych na potrzeby motoryzacji podejmowana jest intensywnie od końca XX wieku, przy czym szczególne zainteresowanie tą problematyką można zaobserwować od początku bieżącego stulecia. Problematyka ta jest także intensywnie rozwijana w kraju, co widoczne jest m.in. w postaci licznych prac doktorskich i habilitacyjnych, prac naukowo-badawczych oraz wzroście liczby artykułów naukowych dotyczących różnych aspektów stali AHSS. Jednym z głównych celów niniejszej monografii jest zebranie w jednym zwartym opracowaniu najważniejszych i najbardziej aktualnych informacji dotyczących przemian fazowych i spawalności wysokowytrzymałych stali wielofazowych.

Na wstępie przedstawiono wymagania przemysłu motoryzacyjnego stawiane wobec nowoczesnych konstrukcji nośnych samochodów osobowych, co stanowi platformę współpracy i wymiany informacji pomiędzy rynkiem motoryzacyjnym, sektorem przemysłu hutniczego oraz ośrodkami badawczo-rozwojowymi i akademickimi. W zasadniczej części monografii skoncentrowano się na charakterystyce i podziale stali wielofazowych, przemianach fazowych zachodzących podczas chłodzenia stali oraz umocnieniu stali wielofazowych ze szczególnym uwzględnieniem wpływu Mn i indukowanego odkształceniem



przemiany martenzytycznej na rozwój mikrostruktury produktów przemian austenitu przechłodzonego lub austenitu poddanego odkształceniu plastycznemu. W pracy poruszono problematykę kształtowania mikrostruktury taśm wytwarzanych przez walcowanie na zimno oraz w blachach taśmowych walcowanych na gorąco. W ostatniej części pracy określono spawalność wysokowytrzymałych stali wielofazowych w klasycznych oraz zmodyfikowanych cyklach spawania laserowego, jako zasadniczą własność technologiczną decydującą o zastosowaniu blach karoseryjnych.

Treść monografii opracowano w oparciu o najnowsze dane dostępne w literaturze światowej oraz krajowej. Materiał zawiera wybrane dane będące wynikiem wieloletnich prac własnych autora oraz współpracowników w zakresie wysokowytrzymałych stali wielofazowych. Szczególną uwagę poświęcono stalom średniomanganowym, jako najnowszemu osiągnięciu metaloznawstwa w zakresie wysokowytrzymałych taśmowych blach karoseryjnych.

## STRESZCZENIE

Monografia dotyczy wybranych aspektów inżynierii wytwarzania wysoko-wytrzymałych stali wielofazowych dedykowanych do zastosowań na blachy karoseryjne. Dokonano obszernego przeglądu literaturowego w zakresie głównych wymagań przemysłu motoryzacyjnego oraz nowych rozwiązań materiałowych wprowadzanych dla taśm stalowych, łączących wysoką wytrzymałość, plastyczność i spawalność. Scharakteryzowano dobór składu chemicznego oraz parametrów obróbki cieplnej dla stali wielofazowych o mikrostrukturach: ferrytyczno-martenzytycznej (DP), ferrytyczno-bainitycznej (FB), ferrytyczno-bainitycznej z austenitem szczątkowym (TRIP), bainitycznej z austenitem szczątkowym (BAIN), martenzytycznej z austenitem szczątkowym (MART i QP) oraz bainityczno-austenitycznych (ferrytyczno-austenitycznych) typu Mn-TRIP.

Wyniki badań własnych obejmują 4 główne zagadnienia związane z badaniami odkształcalności na gorąco, badaniami przemian fazowych podczas chłodzenia, badaniami ewolucji mikrostruktury podczas odkształcenia na zimno, stymulowaną indukowaną odkształceniem przemianą martenzytyczną (efekt TRIP) oraz badaniami spawalności stali wielofazowych. Badania prowadzono głównie na stalach średniomanganowych o zawartości Mn od 3 do 5%, zawierających 1,5% Al oraz stalach typu Si-Al o osnowie ferrytycznej.

Odkształcalność na gorąco badano w próbach ściskania ciągłego, dwuetapowego odkształcania oraz przeprowadzono symulację fizyczną walcowania na gorąco blach taśmowych. Określono wpływ temperatury i szybkości odkształcenia oraz wpływ Mn i mikrododatku Nb na opór odkształcenia plastycznego na gorąco oraz procesy odbudowy mikrostruktury austenitu.

Badania przemian fazowych podczas chłodzenia prowadzono w warunkach chłodzenia ciągłego oraz chłodzenia izotermicznego. Wyznaczono optymalne parametry obróbki cieplnej, pozwalające na stabilizację dużego udziału austenitu szczątkowego.

Określono ewolucję mikrostruktury stali w funkcji wzrastającego odkształcenia oraz temperatury odkształcenia plastycznego w zakresie od  $-20^{\circ}\text{C}$  do  $+140^{\circ}\text{C}$ . Zastosowano kompleksowe metody badawcze do identyfikacji martenzytu odkształceniowego i austenitu szczątkowego.

Badania spawalności prowadzono na stalach wielofazowych typu DP, TRIP i CP. Prowadzono cykle spawania laserowego wiązką pojedynczą oraz wiązką podwójną. Określono zależności pomiędzy parametrami spawania a parametrami geometrycznymi złączy, ich mikrostrukturą i profilami twardości stali.