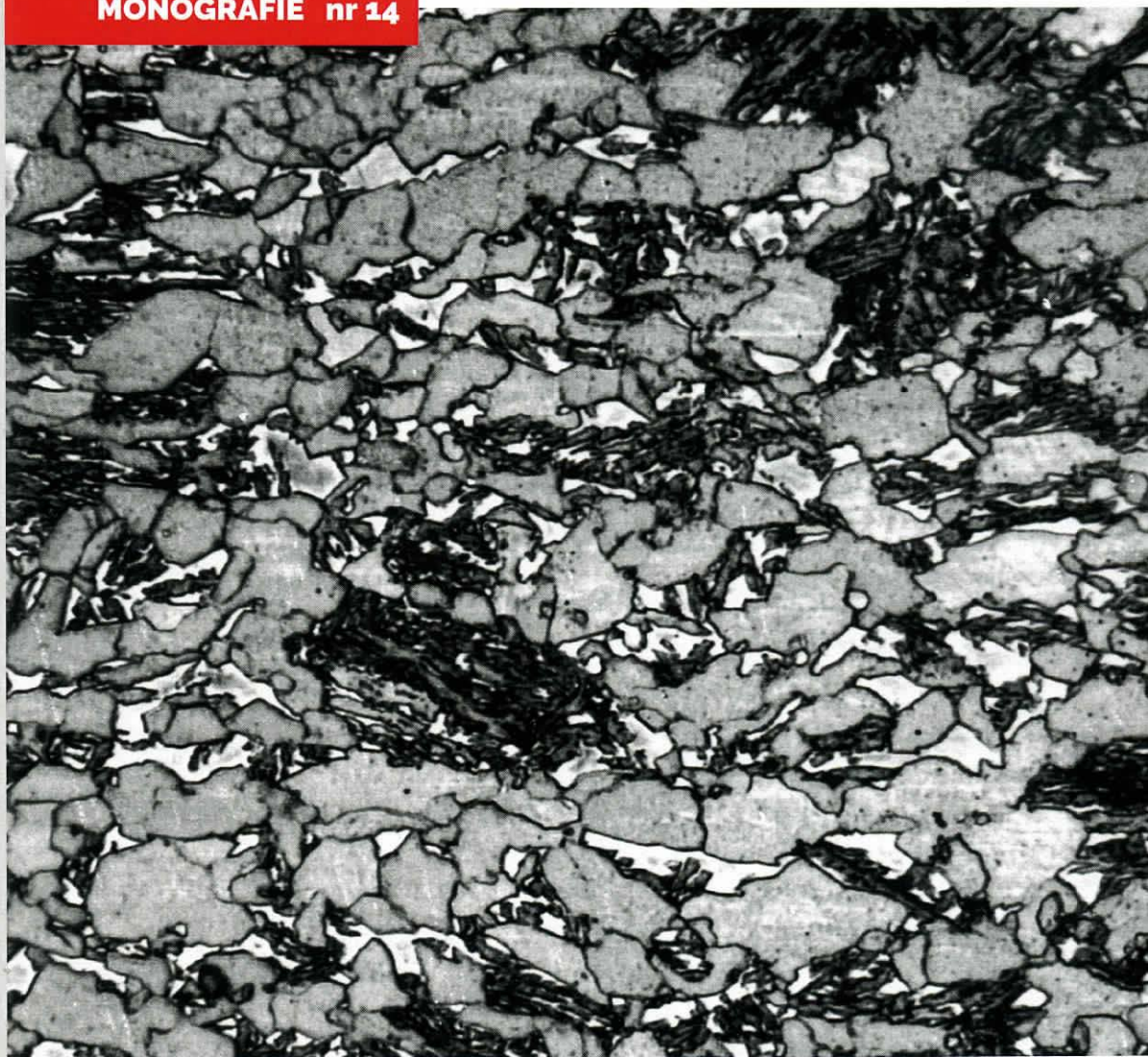


Adam Grajcar

**INŻYNIERIA WYSOKOWYTRZYMAŁYCH
STALI WIELOFAZOWYCH**

MONOGRAFIE nr 14



Sieć Badawcza
ŁUKASIEWICZ
Instytut
Metalurgii Żelaza



Adam Grajcar

**INŻYNIERIA WYSOKOWYTRZYMAŁYCH STALI
WIELOFAZOWYCH**

Gliwice 2019

RECENZENCI

Prof. dr Tadeusz BOLD

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 szczątkowym	41
3.4. Stale wielofazowe umacniane wydzieleniowo	45
3.5. Stale bainityczne z austenitem szczątkowym	47
3.6. Stale martenzytyczne z austenitem szczątkowym	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

6. BADANIA EWOLUCJI MIKROSTRUKTUR STALI WIELOFAZOWYCH PODCZAS ODKSZTAŁCENIA	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
7. BADANIA SPAWALNOŚCI STALI WIELOFAZOWYCH. . . .	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
8. PODSUMOWANIE.	193
STRESZCZENIE	197

Contents

LIST OF IMPORTANT SYMBOLS AND ABBREVIATIONS.	7
1. INTRODUCTION.....	11
2. HIGH-STRENGTH STEELS AND AUTOMOTIVE INDUSTRY.....	15
References to chapter 2.	29
3. CHARACTERISTICS AND TYPES OF MULTIPHASE STEELS	31
3.1. Ferritic-martensitic steels	35
3.2. Ferritic-bainitic steels	38
3.3. Multiphase steels with retained austenite	41
3.4. Precipitation-strengthened multiphase steels	45
3.5. Bainitic steels with retained austenite	47
3.6. Martensitic steels with retained austenite	49
3.7. Medium-manganese steels.....	50
References to chapter 3	55
4. RESEARCH OF HOT DEFORMABILITY	61
4.1. Continuous compression tests	62
4.2. Determination of austenite recrystallization kinetics	66
4.3. Physical simulation of hot strip rolling.....	70
References to chapter 4	80
5. RESEARCH OF PHASE TRANSFORMATIONS DURING COOLING.....	83
5.1. Thermodynamic stability of austenite.....	83
5.2. Heat treatment strategies for multiphase steels	86
5.3. Phase transformations in medium-manganese steels	89
References to chapter 5	99

6. RESEARCH OF MICROSTRUCTURE EVOLUTION OF MULTIPHASE STEELS DURING DEFORMATION	103
6.1. Microstructure evolution of medium-manganese steel.	103
6.2. Effect of temperature on microstructure evolution and steel properties	118
6.2.1. Microstructure evolution of ferrite matrix steel	118
6.2.2. Microstructure evolution of medium-manganese steel . . .	138
References to chapter 6	150
7. RESEARCH OF MULTIPHASE STEELS WELDABILITY . .	155
7.1. Weldability of body steel sheets	155
7.2. Weldability of DP steels	161
7.3. Weldability of TRIP steels	172
7.4. Weldability of CP steels	182
References to chapter 7	190
8. SUMMARY	193
ABSTRACT	199

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 „orędowników” 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 umożliwia 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 indukowanej 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.

8. PODSUMOWANIE

Przytoczone dane literaturowe oraz wyniki badań własnych wskazują, że problematyka wysokowytrzymałych stali wielofazowych na blachy karoseryjne jest aktualnym problemem naukowo-badawczym. Składy chemiczne tych stali oraz złożona mikrostruktura determinują kompleksowe podejście, jakie jest wymagane przy projektowaniu profili obróbki cieplnej lub profili złożonych cykli spawalniczych. W monografii przedstawiono wyniki badań własnych w zakresie stali wielofazowych I generacji AHSS o osnowie ferrytycznej oraz dla stali średniomanganowych (III generacja AHSS), jako najnowszego osiągnięcia współczesnej inżynierii materiałowej w zakresie wysokowytrzymałych stali karoseryjnych. W każdym z przypadków kluczowa dla końcowych własności mechanicznych i technologicznych jest stabilizacja austenitu szczątkowego na poziomie od 10 do 20%. W warunkach odkształcenia na zimno faza ta podlega przemianom martenzytycznej, wnosząc zarówno wkład w podniesienie wytrzymałości, jak i plastyczności stali.

W pracy scharakteryzowano główne wymagania przemysłu motoryzacyjnego w zakresie wymaganych własności użytkowych dla karoseryjnych blach taśmowych, gdzie jednym z kluczowych aspektów jest ich spawalność. Wykazano, że coraz częściej konwencjonalne stale miękkie oraz HSLA są zastępowane stalami wielofazowymi, ze względu na połączenie ich dużej wytrzymałości, plastyczności oraz zdolności do pochłaniania energii w warunkach obciążeń dynamicznych. Cechy te możliwe są do osiągnięcia dzięki precyzyjnie dobranym składom chemicznym, bazującym na koncepcji podwyższonego stężenia Mn, jako pierwiastka austenitotwórczego oraz Al i/lub Si, odpowiedzialnych za hamowanie wydzielania węglików. Nietypowe składy chemiczne stali wymagają jednak zdefiniowania zmodyfikowanych parametrów wytwórczych w zakresie ich obróbki plastycznej na gorąco, przemian fazowych oraz spawalności.

Z tego względu badania własne dotyczyły czterech głównych aspektów związanych z wytwarzaniem i przetwórstwem stali wielofazowych:

- określenie odkształcalności na gorąco
- określenie sekwencji przemian fazowych podczas chłodzenia
- określenie stabilności mechanicznej austenitu szczątkowego podczas odkształcenia na zimno, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu temperatury
- określenie spawalności stali wielofazowych.

W ramach prowadzonych badań stwierdzono, że badane stale wykazują duży opór kształtowania plastycznego na gorąco, związany z dużą sumaryczną zawartością Mn, Al, Si i Mo. Wpływ Mn w zakresie od 3 do 5% na wartość naprężeń uplastyczniających jest znikomy, natomiast postęp rekrytalizacji statycznej jest szybszy w stalach zawierających 5% Mn. Mikrododatek Nb wpływa na zwiększenie wartości naprężeń uplastyczniających oraz opóźnienie przebiegu rekrytalizacji. Symulacje fizyczne walcowania na gorąco blach taśmowych wykazały, że decydujący wpływ na wartość naprężeń uplastycz-

nających ma temperatura końca obróbki plastycznej na gorąco. Wraz z jej obniżeniem od 950 do 750°C naprężenie rośnie od około 250 do 450 MPa. Mangan w zakresie od 3 do 5% nie wywiera wpływu na opór kształtowania plastycznego na gorąco, natomiast mikrododatek Nb wpływa na wzrost naprężenia uplastyczniającego o około 30 MPa. Głównym procesem kontrolującym przebieg umocnienia odkształceniowego austenitu i zakres naprężeń uplastyczniających jest zdrowienie dynamiczne, a w przerwach pomiędzy odkształceniami zachodzi w ograniczonym stopniu rekrytalizacja statyczna. Istotnym elementem poznawczym jest wykazanie, że Nb ma relatywnie niewielki wpływ na przebieg obróbki plastycznej na gorąco, co wynika z jego obecności w roztworze stałym. Za brak wydzielania węglikoazotków Nb odpowiadają zwiększone stężenie Mn, który ogranicza szybkość dyfuzji węgla w austenicie oraz duża zawartość Al w badanych stalach, która efektywnie hamuje procesy wydzieleniowe poprzez związanie azotu.

Realizacja przemian fazowych austenitu przechłodzonego po wieloetapowym odkształceniu w warunkach dostosowanych do kinetyki przemian austenitu przechłodzonego prowadzi do uzyskania drobnoziarnistych produktów jego przemian. Stal typu 0,43C-1,5Mn-1Al-1Si wykazuje osnovę ferrytyczną o udziale około 40% i wyspy bainityczne zawierające około 20% austenitu szczątkowego o postaci blokowej oraz cienkie warstwy tej fazy ułożone pomiędzy listwami ferrytu bainitycznego. W przypadku stali zawierających 3% Mn są to mikrostruktury bainityczne z austenitem szczątkowym, a stale o stężeniu 5% Mn wykazują mikrostruktury bainityczno-martenzytyczne z austenitem szczątkowym. Optymalna temperatura i czas wytrzymania izotermicznego badanych stali ze względu na stabilizację austenitu szczątkowego wynoszą 400°C i 300 s. W tych warunkach można zachować od 14 do 20% fazy γ w stalach zawierających 3% Mn oraz od 8 do 12% austenitu w stalach o większej zawartości Mn.

Wykazano, że wraz ze wzrostem stężenia Mn do 5% maleje udział austenitu szczątkowego, co związane jest z większą hartownością stali i mniejszą tendencją do wzbogacenia fazy γ w węgiel. Zawartość węgla w stalach typu 3Mn wynosi około 1,2% i maleje do około 1% w stalach zawierających 5% Mn. Związane to jest z rosnącą rozpuszczalnością węgla w ferrycie (ferrycie bainitycznym) wraz ze wzrostem stężenia Mn. W przypadku typowych stali średniomanganowych o zawartości Mn w zakresie 7÷12% nie ma to większego wpływu na stabilizację fazy γ , gdyż temperatura M_s jest znacznie niższa od temperatury pokojowej. W przypadku badanych stali o ekonomicznie dobranym składzie chemicznym (preferowanym przez przemysł) i zakresie Mn od 3 do 5% bardzo istotne jest łączne stężenie Mn i C w stali. W przypadku stali 5Mn wykazano, że możliwa jest stabilizacja fazy γ w wyniku wyżarzania międzykrytycznego i ciągłego chłodzenia do temperatury pokojowej. Pozytywne efekty uzyskano po obniżeniu temperatury wygrzewania do 700°C, gdzie następuje maksymalne wzbogacenie austenitu w węgiel. Dla wyższych tempera-

tur wygrzewania (od 720 do 800°C) dochodzi do przemiany martenzytycznej w końcowym etapie chłodzenia. W przypadku stali 3Mn temperatura M_s jest wyższa od pokojowej, co wymaga zastosowania przystanku izotermicznego i wzbogacenia fazy γ w węgiel w warunkach niekompletnej przemiany bainitycznej. Wykazano także, że narzędzia termodynamiki obliczeniowej nie są do końca skuteczne w symulacji przemian fazowych dla nowo projektowanych składów chemicznych stali AHSS, zawierających podwyższone stężenia Mn i Al, silnie oddziałujących na kinetykę przemian fazowych.

Rozwój mikrostruktury stali podczas odkształcenia plastycznego na zimno monitorowano w funkcji wzrastającego odkształcenia, a także w funkcji temperatury w zakresie od -20°C do +140°C. W przypadku stali o podstawie ferrytycznej najlepsze połączenie wytrzymałości i plastyczności uzyskano w temperaturze 60°C, a dla stali średniomanganowej w temperaturze pokojowej. W niższej temperaturze indukowana odkształceniem przemiana martenzytyczna przebiega zbyt gwałtownie (zbyt szybkie umocnienie), co skutkuje zanizoną plastycznością. W wyższych temperaturach austenit staje się bardziej stabilny i jego wkład w efekt TRIP i towarzyszące temu efektowi zwiększenie plastyczności są znikome.

Poprawę plastyczności stali średniomanganowych należy upatrywać w dalszej optymalizacji parametrów wyżarzania międzykrytycznego, m.in. poprzez wydłużenie czasu wyżarzania międzykrytycznego w temperaturze 700°C. Taki cykl cieplny stosowany jest podczas wyżarzania kołpakowego blach taśmowych.

Charakterystycznym efektem strukturalnym towarzyszącym odkształceniu stali średniomanganowych w zakresie temperatury od 60 do 140°C jest występowanie efektu PLC na krzywych rozciągania. Korzystnie, ząbkowanie nie występuje w temperaturze pokojowej, co ma zazwyczaj miejsce dla stali o stężeniu Mn powyżej 5%. Dodatkowo w odróżnieniu od doniesień literaturowych niejednorodne odkształcenie zachodzi dopiero w zakresie odkształcenia po utworzeniu się szyjki. Opóźnienie ząbkowania do wyższych odkształceń oraz wyższych temperatur związane są z ograniczeniem stężenia Mn w badanych stalach, gdyż niejednorodne odkształcenie wynika z wzajemnego oddziaływania atomów Mn i C (tworzą się klastry tych pierwiastków), stymulowanych dyfuzyjnie temperaturą odkształcenia.

Wykazano, że identyfikacja strukturalna austenitu szczątkowego oraz martenzytu odkształceniowego w stalach wielofazowych wymaga kompleksowego wykorzystania technik mikroskopowych o zróżnicowanej zdolności rozdzielczej oraz metody rentgenowskiej. Szczególnie przydatnym narzędziem jest metoda EBSD, która dostarcza niezbędnych danych ilościowych w zakresie identyfikacji faz, ich wielkości, rozwoju granic ziarn i podziarn, itp. Istotnych danych mogą dostarczyć także wyniki analizy składników strukturalnych w oparciu o topografię powierzchni i profile wysokości uzyskane w mikroskopie sił atomowych. Austenit jako faza o największej odporności korozyjnej po-

siada największą wysokość spośród wszystkich składników strukturalnych. Znając rozłożenie fazy γ można dokonać identyfikacji martenzytu odkształceniowego. Niezależnie od rodzaju badanej stali potwierdzono, że przemiana martenzytyczna zachodzi najpierw w środkowej części ziarn, pozostawiając obrzeża nieprzemienione. Wiąże się to z największym dyfuzyjnym wzbogaceniem w węgiel granicznych obszarów ziarn austenitu.

Biorąc pod uwagę, że zasadniczą własnością technologiczną charakteryzującą karoseryjne blachy taśmowe jest spawalność, przeprowadzono próby przetapiania laserowego stali wielofazowych typu DP, TRIP i CP. Największe wyzwania technologiczne wiążą się ze spawaniem stali TRIP, gdyż zawierają one największe stężenie C oraz dodatków stopowych Mn, Si i Al. Konsekwencją tego jest występowanie licznych tlenkowych wtrąceń niemetalicznych, zawierających te pierwiastki.

Szczególnie przydatnym narzędziem do spawania laserowego badanych stali jest zastosowanie wiązki rozszczepionej. Pierwsza wiązka dokonuje zasadniczego przetopienia, podczas gdy wiązka druga wykonuje obróbkę cieplną połączenia. Wykazano, że możliwe jest uzyskanie bardzo szerokiej gamy konfiguracji geometrycznych spoin w zależności od parametrów procesu. Do najważniejszych z nich należą: energia liniowa spawania, podział mocy wiązki, ogniskowa oraz odległość pomiędzy wiązkami.

Największą twardością w przypadku strefy przetopienia charakteryzowała się stal TRIP, dla której twardość wynosi około 480 HV. Natomiast najmniejszą twardością w strefie przetopienia (wynoszącą około 365 HV) charakteryzowała się stal CP. Podobna tendencja widoczna jest w przypadku strefy wpływu ciepła. Najwyższa twardość w przypadku stali TRIP spowodowana jest jej największą hartownością (0,24% C). Dodatkowo charakteryzuje się ona największym równoważnikiem węgla. W przypadku stali CP mała twardość połączenia spawanego spowodowana jest niską zawartością węgla w stali (0,08%). Niska zawartość węgla powoduje małe przesycenie martenzytu węglem, zmniejszając jego twardość.

Zastosowanie spawania laserowego wiązką zogniskowaną w dwóch punktach wpływa pozytywnie na właściwości połączeń spawanych. Twardości otrzymane dla wiązki podwójnej były mniejsze w porównaniu do spawania laserowego wiązką zogniskowaną w jednym punkcie. Spadek twardości w odniesieniu do wiązki pojedynczej spowodowany jest zajściem procesów o charakterze zbliżonym do odpuszczania, o czym świadczy zdefragmentowana morfologia martenzytu. Taką morfologię martenzytu uzyskuje się w strefie przetopienia jak i strefie wpływu ciepła dla każdej z analizowanych stali wielofazowych. Optymalna odległość między wiązkami dla redukcji twardości wynosi 4 mm. Charakterystyczną cechą stali o podwyższonym stężeniu Al i Si jest tendencja do uzyskiwania austenitu szczątkowego w strefie złączy, szczególnie w zakresie międzykrytycznej SWC. Dalsze badania będą dotyczyć określenia spawalności stali średniomanganowych.

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 podstawie 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°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.

HIGH STRENGTH MULTIPHASE STEELS ENGINEERING

ABSTRACT

The monograph concerns selected aspects of the production engineering of advanced high strength multiphase steels dedicated to car body sheets. The comprehensive state of the art concerning main automotive requirements and new material solutions for the sheets, which combine high strength, plasticity and weldability, has been covered. The selection of chemical composition and heat treatment parameters for the multiphase steels with the following microstructures have been characterized: ferritic-martensitic (DP), ferritic-bainitic (FB), ferritic-bainitic with retained austenite (TRIP), bainitic with retained austenite (BAIN), martensitic with retained austenite (MART and QP) and Mn-TRIP type bainitic-austenitic (ferritic-austenitic).

Results of the own research include 4 major issues related to hot plasticity, phase transformations during cooling, the microstructure evolution stimulated by strain-induced martensitic transformation (TRIP effect) during cold straining and weldability of the multiphase steels. The research results are presented for medium manganese steels containing from 3 to 5% Mn, 1,5% Al and ferrite-based matrix Si-Al type steels.

The hot plasticity was investigated using the continuous compression tests, double-hit compression tests and the physical simulation of hot strip rolling. The effects of temperature, strain rate, Mn addition and Nb microaddition on the hot working resistance and softening kinetics of the austenite have been determined.

The investigations of phase transformations during cooling were conducted under continuous and isothermal cooling conditions. The optimum parameters of heat treatment, which allow to stabilize a large fraction of retained austenite, have been determined.

The evolution of the steel microstructure as a function of increasing strain and deformation temperature in a range from -20°C to +140°C has been determined. The complex research methods have been used for the identification of strain-induced martensite and retained austenite.

Weldability tests have been performed for DP, TRIP and CP multiphase steels. The laser welding cycles using a single spot and twin spot have been conducted. The relationships between welding parameters and geometrical parameters of the joints, their microstructures and hardness profiles have been determined.

www.imz.pl

ISBN 978-83-938130-6-3