

# Mikrostruktura i właściwości stali o wysokiej wytrzymałości AHSS

## Microstructure and mechanical properties of Advanced High – Strength Steels (AHSS)

### Streszczenie

Przedstawiono nowe stale o wysokiej wytrzymałości AHSS na podstawie analizy danych źródłowych. Zaprezentowano składy chemiczne i właściwości mechaniczne wybranych gatunków tych stali.

Stale o wysokiej wytrzymałości coraz częściej używane są w przemyśle motoryzacyjnym oraz w budowie ciężkich maszyn. Właściwości mechaniczne i ciągliwość tych stali pozwalają na projektowanie lżejszych i bardziej wytrzymałych konstrukcji o dotąd nieosiągalnych możliwościach. Spawalność stali AHSS jest dobra. Dzięki prostemu składowi chemicznemu i małej liczbie dodatków stopowych możliwość doboru metody i parametrów spawania jest szeroka i dotyczy zarówno zgrzewania, jak i spawania metodami MMA, GTA i GMA.

### Abstract

The characteristic of this novel group of steels is done on literature source bases. Chemical composition and mechanical properties of representatives of different groups of these steels is presented. Advanced High-Strength Steels are increasingly used in the automotive industry and in the construction of heavy machines. The mechanical properties and toughness of these steel permit to design lighter and high strength structures with previously unattainable possibilities. Weldability of these steels is defined as a good. Due to a plain chemical composition and small amount of alloying elements, possibility of welding method and parameters selection is large and allow use well known resistance spot welding as well as MMA, GTA and GMA methods.

### Wstęp

Wyjątkowe właściwości mechaniczne stali o wysokiej wytrzymałości AHSS (AHSS – *Advanced High-Strength Steel*) są efektem umocnienia w wyniku przemian fazowych w zakresie temperatur współistnienia ferrytu i przechłodzonego austenitu w warunkach odkształcenia plastycznego lub szybkiego chłodzenia z austenitu w celu utworzenia struktury martenzytycznej.

Stale AHSS stały się szczególnie atrakcyjne w produkcji pojazdów z trzech ważnych powodów:

- dużej wytrzymałości na rozciąganie, do 1700 MPa,
- dużej granicy plastyczności, do 1450 MPa,
- dużego wydłużenia  $A_{80}$ , do 30%.

Stale o wysokiej wytrzymałości stosunkowo łatwo poddają się obróbce plastycznej i obróbce skrawaniem.

Wzrost zastosowania nowoczesnych stali AHSS w przemyśle motoryzacyjnym wynika z możliwości zmniejszenia grubości blach karoseryjnych z jednoczesnym polepszeniem właściwości mechanicznych konstrukcji w porównaniu z zastosowaniem konwencjonalnych stali.

Zastosowanie stali AHSS powoduje zmniejszenie masy konstrukcji oraz mniejsze zużycie energii na jej wytworzenie. Stale o wysokiej wytrzymałości znajdują zastosowanie nie tylko w produkcji pojazdów, ale także urządzeń dźwigowych, wsięgników maszyn, urządzeń przeładunkowych do transportu morskiego, maszyn budowlanych i ram wózków kolejowych. Istotną zaletą tej grupy stali jest również ich umiarkowana cena wynikająca z małej liczby dodatków stopowych, możliwość zmniejszenia przekrojów konstrukcji oraz dobre właściwości technologiczne, w tym spawalność i skrawalność.

Te cechy stali AHSS powodują wzrost ich udziału szczególnie w produkcji pojazdów, gdzie ich masa może być zmniejszona nawet o 25%. Geneza rozwoju badań prowadzonych nad stalami AHSS wynika z konieczności zwiększenia wytrzymałości i sztywności

**Mgr inż. Sławomir Krajewski, prof. dr hab. inż. Jerzy Nowacki** – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie.

kluczowych elementów pojazdu mających wpływ na bezpieczeństwo pasażera. Przemiana austenitu szczątkowego w martenzyt podczas odkształcania stali powoduje pochłanianie energii kinetycznej, co ma znaczenie w przypadku kolizji drogowych [1÷4].

## Mikrostruktura i właściwości stali o wysokiej wytrzymałości

Stale AHSS swoją wytrzymałość zawdzięczają połączeniu zróżnicowanych faz, takich jak bainit, ferryt, martenzyt i austenit szczątkowy. Wielofazowe stale AHSS pozostają plastyczne pomimo obecności w nich martenzytu i/lub bainitu. Każda faza ma określone właściwości fizyczne i mechaniczne wynikające z sił działających pomiędzy atomami w kryształach.

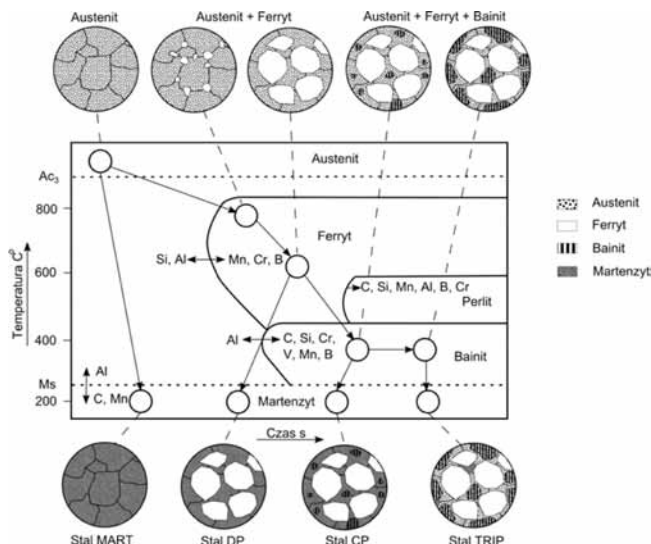
Pierwszym etapem procesu obróbki stali jest odkształcenie plastyczne w wyniku walcowania na gorąco (w przypadku stali CP i MART) w temperaturze trwałości austenitu (850°C) lub walcowanie na zimno (w przypadku stali DP i TRIP). Drugim etapem procesu jest walcowanie z kontrolowanym chłodzeniem. W produkcji stali MART od razu po walcowaniu blach na gorąco przeprowadzane jest hartowanie martenzytyczne.

Proces technologiczny stosowany do obróbki w linii produkcyjnej polega na ciągłym walcowaniu na gorąco stali w zakresie występowania czystego austenitu, a następnie bardzo szybkim chłodzeniu wodą. W przypadku dalszego wyżarzania kontrolowany jest stosunek ilości względnej austenitu i ferrytu.

W celu otrzymania mikrostruktury stali DP przeprowadzane jest gwałtowne chłodzenie z temperatury austenitacji, aby nie zaszła dalsza przemiana powodująca pojawienie się bainitu bądź perlitu. Wskutek tego zachodzi przemiana austenitu w martenzyt. Stale te produkowane są przez kontrolowane chłodzenie z fazy austenitu (z wyrobów walcowanych na gorąco) albo ze stali ferrytyczno-austenitycznych (wyżarzanych i walcowanych na zimno, a następnie wysoko odpuszczanych).

W celu uzyskania struktury trójfazowej – typowej dla stali CP, wyżarzanie realizowane jest tak, aby z pozostałego austenitu częściowo wytworzyć strukturę bainityczną, a częściowo martenzytyczną. Otrzymana struktura ma lepsze właściwości mechaniczne, między innymi z powodu drobnoziarnistości.

Produkcja stali TRIP przebiega podobnie jak stali CP, lecz podczas ostatniej przemiany zachowane są warunki dla przebiegu przemiany izotermicznej w celu dalszego rozdrobnienia ziarna i stabilizacji austenitu w wyniku wzbogacania go w węgiel. Zapewnia to stabilność mikrostruktury w temperaturze pokojowej. Składniki stopowe: mangan, chrom, aluminium, bor, krzem i molibden ułatwiają przechodzenie przemian podczas chłodzenia. Wymienione przemiany przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat przemian fazowych przy chłodzeniu stali. Opracowanie własne na podstawie [5]

Fig. 1. Diagram of phase transition during the steel cooling. Own work on the basis of [5]

## Podstawowe grupy stali o wysokiej wytrzymałości

W grupie stali o wysokiej wytrzymałości można wyróżnić [6÷18]:

- stale martenzytyczne – MART,
- stale dwufazowe – DP,
- stale complex – CP,
- stale z efektem TRIP.

**Stale martenzytyczne** MART są stalami konstrukcyjnymi niskostopowymi, walcowanymi na zimno. Charakteryzują się bardzo wysoką granicą plastyczności i wytrzymałością na rozciąganie. Wydłużenie względne jest wystarczające do kształtowania na zimno. Do spajania blach ze stali martenzytycznej można używać tych samych metod łączenia jak dla standardowych blach stalowych, dzięki małej ilości dodatków stopowych przy zachowaniu dużej wytrzymałości. Obecnie najbardziej wytrzymałą stalą konstrukcyjną jest stal Optim 1500 QC Ruukki. Ta niezwykła stal ma też dobrą odporność na ścieranie i korozję. W swojej ofercie Ruukki oferuje blachy pancerne Ramor, które zapewniają maksymalną ochronę i bezpieczeństwo dzięki dużej twardości i wytrzymałości.

Stale o wysokiej wytrzymałości stosuje się na tarce sprzęgła, narzędzia tnące, sejfy bankowe, noski i podeszwy na obuwiu ochronne, sprzęt wojskowy opancerzony oraz elementy zwiększające bezpieczeństwo w autach. W tabelicy I przedstawiono skład chemiczny, a w tabelicy II właściwości mechaniczne stali martenzytycznych różnych producentów.

**Stale dwufazowe** DP (Dual-Phase Steel) mają osnowę ferrytyczną z wtrąceniami martenzytu, jednakże po obróbce cieplnej zostaje ok. 5÷10% austenitu szczątkowego, który jest metastabilny. Nadaje on stali skłonność do umocnienia podczas pracy (ruchy

**Tablica I.** Skład chemiczny wybranych stali martenzytycznych MART  
**Table I.** Chemical composition of selected martensitic steels (MART)

Stal	Skład chemiczny, %											
	C	Si	Mn	P	S	Ti	Cr	Al	Nb	B	Ni	Mo
Docol 900M	0,05	0,20	2,00	0,010	0,002	0	0	0,04	0	0	0	0
Docol 1000DPZE	0,15	0,50	1,50	0,010	0,002	0	0	0,04	0,015	0	0	0
Docol 1100M	0,09	0,20	1,70	0,010	0,002	0,025	0	0,04	0,015	0	0	0
Docol 1200M	0,11	0,20	1,70	0,010	0,002	0,025	0	0,04	0,015	0	0	0
Docol 1300M	0,20	0,20	1,50	0,010	0,002	0,025	0	0,04	0,015	0	0	0
Docol 1400M	0,17	0,20	1,40	0,010	0,002	0,025	0	0,04	0,015	0	0	0
Docol 1500M	0,21	0,20	1,10	0,010	0,002	0,025	0	0,04	0,015	0	0	0
Docol 900MZE	0,05	0,20	1,90	0,010	0,002	0,000	0	0,04	0	0	0	0
Docol 1200MZE	0,11	0,20	1,70	0,010	0,002	0,035	0	0,04	0	0,002	0	0
Docol 1400MZE	0,17	0,20	1,40	0,010	0,002	0,035	0	0,04	0	0,002	0	0
Docol 1500MZE	0,21	0,20	1,10	0,010	0,002	0,035	0	0,04	0	0,002	0	0
MS-W 1200	0,18	0,80	2,00	0,020	0,010	0,050	1	0	0,1	0	0	0
Optim 900 QC	0,10	0,25	1,15	0,020	0,010	0,070	0	0	0	0	0	0
Optim 960 QC	0,11	0,25	1,20	0,020	0,010	0,070	0	0	0	0	0	0
Optim 1100 QC	0,15	0,30	1,25	0,020	0,010	0,070	0	0	0	0	0	0
Raex 300	0,18	0,70	1,70	0,025	0,015	0	1,5	0	0	0,005	0,4	0,5
Raex 400	0,25	0,70	1,70	0,025	0,015	0	1,5	0,06	0	0,005	0,7	0,5
Raex 450	0,26	0,70	1,70	0,025	0,015	0	1	0,06	0	0,005	0,7	0,5
Raex 500	0,30	0,70	1,70	0,025	0,015	0	1	0,06	0	0,005	0,8	0,5
Ramor 400	0,24	0,70	1,50	0,020	0,015	0	1	0	0	0,005	1	0,7
Ramor 500	0,32	0,70	1,50	0,020	0,015	0	1	0	0	0,005	2	0,7
SZMS1200	0,18	0,15	2,00	0,020	0,010	0	0,6	0,02	0	0	0	0

Opracowanie własne na podstawie danych producentów

**Tablica II.** Właściwości mechaniczne wybranych stali martenzytycznych MART

**Table II.** Mechanical properties of selected martensitic steels (MART)

Stal	Właściwości mechaniczne				
	$R_{e\ min}$ MPa	$R_{e\ max}$ MPa	$R_{m\ min}$ MPa	$R_{m\ max}$ MPa	$A_{80}$ %
Docol 900M	700	1000	900	1100	6
Docol 1000DPZE	700	950	1000	1200	7
Docol 1100M	860	1100	1100	-	5
Docol 1200M	950	1150	1200	1400	3
Docol 1300M	1030	1300	1300	-	3
Docol 1400M	1150	1350	1400	1600	3
Docol 1500M	1200	1500	1500	1700	3
Docol 900MZE	700	-	900	1100	3
Docol 1200MZE	950	-	1200	1400	3
Docol 1400MZE	1150	-	1400	1600	3
Docol 1500MZE	1200	-	1500	1700	3
MS-W 1200	900	-	1200	1400	5
Optim 900 QC	900	1000	1050	1150	11
Optim 960 QC	960	1060	1080	1180	10
Optim 1100 QC	1100	1200	1280	1380	8
Optim 1500 QC	1460	-	1650	1850	5
Raex 300	900	-	1000	-	11
Raex 400	1000	-	1250	-	10
Raex 450	1200	-	1450	-	8
Raex 500	1250	-	1600	-	8
Ramor 400	1100	-	1300	-	8
Ramor 500	1450	-	1700	-	7
SZMS1200	900	1050	1200	1450	5

Opracowanie własne na podstawie danych producentów

dyslokacji w krystalicznej strukturze metalu). W jednej fazie ferryt zapewnia formowalność, a w drugiej fazie martenzyt (20÷70%) zwiększa wytrzymałość. Stale dwufazowe mają umowną granicę plastyczności sięgającą 800 MPa. Na początku procesu formowania umacniają się najbardziej i granica ta może osiągnąć 1000 MPa. W miejscach odkształceń rozszerzają się obszary występowania martenzytu, polepszając właściwości stali. Prędkość odkształcenia i duże wydłużenie względne nadaje stali DP większą wytrzymałość niż konwencjonalnym stalom o podobnej plastyczności. Naprężenia wewnętrzne niwelowane są przez umacnianie drugiej fazy w martenzyt, co powoduje niższy stosunek  $R_e/R_m$ . Podczas zderzenia energia jest lepiej pochłaniana przez materiał i są mniejsze skutki odkształceń. Stale DP wskutek ubogiej zawartości pierwiastków stopowych charakteryzują się dobrą spawalnością, są dobrze formowalne na zimno; podczas walcowania czy operacji gięcia zaleca się przeprowadzać je poprzecznie do kierunku walcowania.

Stale te znajdują zastosowanie jako rury w wózkach dziecięcych lub ramach od rowerów, zwiększając także bezpieczeństwo w samochodach, gdzie wykonywane z nich są wzmocnienia zderzaków i prowadnice foteli, feltek dziecięcych, słupki drzwiowe i koła. Dzięki wysokiej wytrzymałości oraz dużej twardości wpływającej na odporność na ścieranie, wykonywane są z nich również: tarcze sprzęgła, maszyny do cięcia żywoptów, noże, łańcuchy na piły.

W stalach DP stosuje się dodatki stopowe takie jak: mangan, chrom, molibden i nikiel, które zwiększają hartowność stali. Zwiększając udział węgla, zwiększa się ilość martenzytu. Od zawartości krzemu i fosforu

**Tablica III.** Skład chemiczny wybranych stali dwufazowych DP  
**Table III.** Chemical composition of selected dual-phase steels (DP)

Stal	Skład chemiczny, %											
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	Nb	V	B	Cr-Mo	Nb-Ti
Docol 450DP	0,05	0,20	1,50	0,01	0,002	0	0,04	0	0	0	0	0
Docol 500DP	0,08	0,30	0,65	0,01	0,002	0	0,04	0	0	0	0	0
Docol 600DP	0,10	0,20	0,80	0,01	0,002	0	0,04	0,015	0	0	0	0
Docol 780DP	0,14	0,20	1,50	0,01	0,002	0	0,04	0,015	0	0	0	0
Docol 800DP	0,13	0,20	1,50	0,01	0,002	0	0,04	0,015	0	0	0	0
Docol 980DP	0,15	0,50	1,50	0,01	0,002	0	0,04	0,015	0	0	0	0
Docol 1000DP	0,15	0,50	1,50	0,01	0,002	0	0,04	0,015	0	0	0	0
Docol 1180DP	0,15	0,50	1,50	0,01	0,002	0	0,04	0,015	0	0	0	0
Dogal 800 DPX	0,16	0,25	1,90	0,02	0,004	0,6	0,02	0	0	0	0	0
Dogal 1000 DPX	0,20	0,25	1,90	0,02	0,004	0,4	0,02	0	0,02	0,001	0,8	0,03
DP-K 30/50	0,10	0,30	1,80	0,04	0,010	0	0,1	0	0	0,005	1	0,15
DP-K 34/60	0,14	0,50	2,00	0,04	0,010	0	1,5	0	0	0,005	1	0,15
DP-K 34/60 HF	0,14	0,30	2,00	0,04	0,010	0	1,5	0	0	0,005	1	0,15
DP-K 45/78	0,18	0,50	2,20	0,04	0,010	0	1,2	0	0	0,005	1	0,15
DP-K 60/90	0,20	0,60	2,50	0,04	0,010	0	1,2	0	0	0,005	1	0,15
DP-W 600	0,12	0,80	1,50	0,06	0,010	0	0,08	0	0	0,005	1	0,15
DP-W 700	0,12	0,80	1,50	0,06	0,010	0	0,08	0	0	0,005	1	0,15
HCT600	0,17	0,80	2,20	0,08	0,015	0	2	0	0,2	0,005	1	0,15
Litec 600 DP	0,17	0,80	2,20	0,01	0,002	0	2	0	0	0	1	0,15
Litec 800 DP	0,18	0,80	2,50	0,01	0,002	0	2	0	0	0	1	0,15
Litec 1000 DP	0,23	0,80	2,50	0,01	0,002	0	2	0	0	0	1	0,15

Opracowanie własne na podstawie danych producentów

**Tablica IV.** Właściwości mechaniczne wybranych stali dwufazowych DP  
**Table IV.** Mechanical properties of selected dual-phase steels (DP)

Stal	Właściwości mechaniczne				
	R <sub>e min</sub> MPa	R <sub>e max</sub> MPa	R <sub>m min</sub> MPa	R <sub>m max</sub> MPa	A <sub>90</sub> %
Docol 450DP	260	330	450	550	27
Docol 500DP	300	370	500	600	24
Docol 600DP	340	410	600	700	21
Docol 780DP	450	560	780	900	15
Docol 800DP	500	640	780	950	10
Docol 980DP	600	750	980	1100	10
Docol 1000DP	700	950	1000	1200	8
Docol 1180DP	830	1220	1180	-	6
Dogal 800 DPX	620	770	800	950	10
Dogal 1000 DPX	800	1000	1000	1200	6
DP-K 30/50	300	370	500	600	24
DP-K 34/60	340	410	600	700	20
DP-K 34/60 HF	340	410	600	700	23
DP-K 45/78	450	780	780	900	14
DP-K 60/90	600	750	980	1120	10
DP-W 600	330	460	580	680	19
DP-W 700	450	580	680	800	16
HCT600	340	420	600	700	20
Litec 600 DP	340	420	600	-	18
Litec 800 DP	450	560	780	-	12
Litec 1000 DP	600	750	980	-	8

Opracowanie własne na podstawie danych producentów

zależy podatność stali na zgrzewanie oporowe i spawalność – brak pęknięć. Stale DP o najwyższych właściwościach mechanicznych mogą wymagać zmiany technologii spajania termicznego. W tablicy III przedstawiono skład chemiczny, a w tablicy IV właściwości mechaniczne stali Dual-Phase różnych producentów.

**Stale complex CP** (Complex-Phase Steel) mają granicę na rozciąganie do 1000 MPa. Stale te są integralną częścią nowej generacji zaawansowanych stali o wysokiej wytrzymałości używanych w przemyśle motoryzacyjnym. Absorbują więcej energii niż już omówione, są mniej podatne na odkształcenia, wykazują się wytrzymałością resztkową po obciążeniu udarowym. Mikrostruktura podobna jest do mikrostruktury stali TRIP z wyjątkiem występowania austenitu. Stale CP składają się z drobnoziarnistych ziaren ferrytu, umacnianych przez bainit i martenzyt. Stale te mają mniejsze ilości dodatków stopowych takich jak niob, tytan i wolfram. Stal może być dodatkowo utwardzana wydzieleniowo.

Stale te są stosowane do budowy zderzaków jako wzmocnienie właściwe, na którym są osadzone przekładki styropianowe i okładziny z tworzywa sztucznego. Dzięki wytrzymałości resztkowej stali i elastycznych tworzyw sztucznych doskonale absorbują energię kolizji. W tablicy V przedstawiono skład chemiczny, a w tablicy VI właściwości mechaniczne stali complex – phase różnych producentów.

**Stale z efektem TRIP.** Struktura stali opiera się na podstawie ferrytu z niestabilnym austenitem szczątkowym (> 5%) oraz kompozycji twardych struktur bainitu i martenzytu w różnych ilościach – co jest wynikiem innej obróbki cieplnej. Struktura wielofazowa zapewnia równowagę właściwości wytrzymałościowych



i plastycznych. Ilość austenitu szczątkowego w końcowej mikrostrukturze można regulować zawartością manganu, aluminium i węgla. Efektem TRIP jest umocnienie ferrytu martenzytem tworzącym się z austenitu szczątkowego pod wpływem energii powodującej odkształcenie plastyczne. Umocnienie się stali ma charakter długofalowy w całym zakresie odkształceń plastycznych.

Efekt TRIP zależy od stabilności austenitu szczątkowego. Jeśli zawartość węgla jest niska, to przemiana następuje natychmiast, bez dużych odkształceń podczas formowania. W przemyśle motoryzacyjnym potrzebne są materiały na detale podatne na tłoczenie, jednocześnie dobrze spawalne i zgrzewalne.

W rzeczywistości kierowanie się zawartością węgla jest największym problemem. Stale TRIP mogą być zaprojektowane z myślą o konkretnym elemencie, który będzie formowany z arkusza, bądź taśmy stalowej. Taki element jest podatny na formowanie metodą obróbki plastycznej (dzięki większej zawartości węgla stal jest stabilna podczas tłoczenia), co umożliwi otrzymanie skomplikowanych kształtów bez ubytku możliwości do późniejszej TRIP (*Transformacji Indukowanej Plastycznością*).

W tabelicy VII przedstawiono skład chemiczny, a w tabelicy VIII właściwości mechaniczne stali z efektem TRIP różnych producentów.

**Tablica V.** Skład chemiczny wybranych stali complex CP

**Table V.** Chemical composition of selected complex-phase steels (CP)

Stal	Skład chemiczny, %										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	V	B	Cr-Mo	Nb-Ti
CP-K 60/78	0,12	0,8	2,2	0,04	0,015	0	1,2	0,2	0,005	1	0,15
CP-W 800	0,12	0,8	2,2	0,04	0,015	0	1,2	0,2	0,005	1	0,15
CP-W 1000	0,17	0,8	2,2	0,04	0,015	0	1,2	0,2	0,005	1	0,15
Dogal 600 CP	0,12	0,3	1,66	0,02	0,004	0,5	0,02	0	0	0	0
Dogal 800 CP	0,16	0,25	1,9	0,02	0,004	0,5	0,015	0	0	0	0
Litec 600CP	0,18	0,8	2,2	0,02	0,004	0	2	0	0	1	0,15
Litec 800CP	0,18	0,8	2,2	0,02	0,004	0	2	0	0	1	0,15
Litec 1000CP	0,23	0,8	2,2	0,02	0,004	0	2	0	0	1,2	0,15

Opracowanie własne na podstawie danych producentów

**Tablica VI.** Właściwości mechaniczne wybranych stali complex CP

**Table VI.** Mechanical properties of selected complex-phase steels (CP)

Stal	Właściwości mechaniczne				
	$R_{e\ min}$ , MPa	$R_{e\ max}$ , MPa	$R_{m\ min}$ , MPa	$R_{m\ max}$ , MPa	$A_{80}$ , %
CP-K 60/78	600	700	780	940	10
CP-W 800	680	830	800	980	10
CP-W 1000	720	920	950	1130	10
Dogal 600 CP	350	500	600	750	16
Dogal 800 CP	500	700	780	950	10
Litec 600 CP	350	500	600	-	14
Litec 800 CP	500	700	780	-	8
Litec 1000 CP	700	900	980	-	5

Opracowanie własne na podstawie danych producentów

**Tabela VII.** Skład chemiczny wybranych stali TRIP

**Table VII.** Chemical composition of selected steels with TRIP

Stal	Skład chemiczny, %							
	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr-Mo	Nb-Ti
Litec 700 TRIP	0,32	0,8	2,5	0,02	0,004	2	0,6	0,2
Litec 800 TRIP	0,32	0,8	2,5	0,02	0,004	2	0,6	0,2
RA-K 40/70	0,24	0,3	2	0,04	0,01	1,6	0,6	0,2

Opracowanie własne na podstawie danych producentów

**Tablica VIII.** Właściwości mechaniczne wybranych stali TRIP

**Table VIII.** Mechanical properties of selected steels with TRIP

Stal	Właściwości mechaniczne				
	$R_{e\ min}$ , MPa	$R_{e\ max}$ , MPa	$R_{m\ min}$ , MPa	$R_{m\ max}$ , MPa	$A_{80}$ , %
Litec 700 TRIP	430	550	690	-	21
Litec 800 TRIP	470	780	780	-	19
RA-K 40/70	410	510	690	790	23

Opracowanie własne na podstawie danych producentów

## Spawalność stali o wysokiej wytrzymałości

Najtrudniejsze do spawania ze wszystkich stali AHSS są stale martenzytyczne. Strefa przyległa do strefy wpływu ciepła jest podatna na pęknięcia niezależnie od wstępnego podgrzania. Niemniej jednak stale martenzytyczne mogą być z powodzeniem spawane pod warunkiem, że zachowa się szczególne środki ostrożności oraz dostarczy wypełniacze, aby uniknąć pęknięć w konstrukcji spawanej. Blachy przeważnie są cienkie, natomiast równoważnik węgla zbliża się do niebezpiecznego poziomu. Powierzchnie spawane powinny być czyste i suche, żeby zapobiegać pęknięciom gorącym. Materiały spawalnicze powinny mieć zbliżone właściwości wytrzymałościowe do materiału łączonego oraz zapewniające niską zawartość wodoru w spoinie. Podczas spawania cienkich blach należy zmniejszyć energię liniową spawania. Ponieważ ciepło ze spoiny nie ma przestrzeni, by się rozprzyszczyć,

mogą powstać niskowytrzymałe pasma wokół złączy (nie można dopuścić do odpuszczania stali). Czas stygnięcia  $t_{8/5}$  nie powinien przekraczać 4 s. Konstrukcje ze stali MART powinny być projektowane z uwzględnieniem lokalizacji złączy, czyli tam, gdzie występują najmniejsze naprężenia. Głównym problemem jest wysoka twardość stali sięgająca ponad 300 HBV. W przeprowadzonych testach zderzeniowych okazało się, że spoina pochłania występujące siły bez pęknięć (spoina zgrzewana indukcyjnie prądami wysokiej częstotliwości *HF-welding*). Elementy konstrukcyjne wykonane ze stali martenzytycznej pomimo wysokiej wytrzymałości wykazują również dużą ciągliwość.

W spajaniu stali DP, CP stosuje się najczęściej punktowe zgrzewanie oporowe lub spawanie łukowe elektrodą metalową w osłonie gazu (GMA), spawanie nietopliwą elektrodą w osłonie gazów obojętnych (TIG), spawanie laserowe, plazmowe oraz ręczne spawanie łukowe elektrodą otuloną (MMA). Spoiny w złączach stali DP, CP mają o wiele większą wytrzymałość niż w złączach innych stali z grupy AHSS.

### Podsumowanie

Stale o wysokiej wytrzymałości AHSS stanowią grupę stali nowej generacji o prostym składzie chemicznym, których mikrostruktura i właściwości kształtowane są w efekcie zaawansowanych procesów technologicznych powodujących umocnienie w wyniku przemian fazowych i odkształcenia plastycznego w warunkach różnych temperatur i różnych szybkości chłodzenia.

Ze względu na ich atrakcyjne właściwości mechaniczne, wyjątkową zdolność pochłaniania energii

w czasie gwałtownych odkształceń stale o wysokiej wytrzymałości AHSS stanowią rozwojową grupę materiałów konstrukcyjnych, które w najbliższych latach powinny znaleźć bardzo szerokie zastosowanie w budowie maszyn i pojazdów.

Problemy spawalności i zgrzewalności tych stali stanowią jeden z ważniejszych problemów rozwoju ich zastosowań i dotyczą w pierwszym rzędzie opracowanie metod spajania zapewniających zachowanie mikrostruktury i właściwości stali w obszarze złącza.

### Literatura

- [1] Chatterjee S., Muruganath M., Bhadeshia H.K.D.H.,  $\delta$ -TRIP Steel. *Materials Science and Technology*, Issue 23/2007, s. 817-823.
- [2] Lis A.K., Gajda B., Modelling of the DP and TRIP microstructure in the CMnAlSi automotive steel, *Jurnal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 15 Issue 1-2/2006, s. 127-134.
- [3] Yi H.L., Lee K.Y., Bhadeshia H.K.D.H., Stabilisation of ferrite in hot rolled  $\delta$ -TRIP steel, *Materials Science and Technology*, Vol. 27, No. 2/2011/525-529.
- [4] Senkara J., Współczesne stale karoseryjne dla przemysłu motoryzacyjnego i wytyczne technologiczne ich zgrzewania, *Przegląd Spawalnictwa* nr 11/2009, s. 3-7.
- [5] Hofmann H., Mattissen D., Schaumann T. W., Advanced cold rolled steels for automotive applications, *Steel Research International* Issue 1/2009, s. 22-28.
- [6] Prospekt AHSS, Material data sheet. Cold-rolled quenched & tempered steel, boron alloyed, for cold forming and subsequent hot forming, (suitable for press hardening), *Salzgitter Flachstahl* 11-12/2005.
- [7] Prospekt AHSS, Retained-austenite RA-K® For complex high-strength components, *ThyssenKrupp Steel*, 2008.
- [8] Prospekt AHSS, SZMS1200 Martensitic grade, *Salzgitter Flachstahl*, 2006.
- [9] Prospekt AHSS, TRIP (TRansformation Induced Plasticity) steels, *Arcelor Mittal*, 2010.
- [10] Prospekt Docol AHSS, Advanced High Strength Steels for the automotive industry, *SSAB Swedish Steel*, 2010.
- [11] Prospekt Docol AHSS, Docol DP/DL Zimnowalcowana stal dwufazowa, *SSAB Swedish Steel*, 2009.
- [12] Prospekt Docol AHSS, Docol M Zimnowalcowana stal martenzytyczna, *SSAB Swedish Steel*, 2008.
- [13] Prospekt Dogal AHSS, Dogal 600 i 780 CP Zaawansowane stale o wysokiej wytrzymałości, *SSAB Swedish Steel* 2008.
- [14] Prospekt Dogal AHSS, Dogal 600 i 800 DP. Stal o extra i ultra wysokiej wytrzymałości, *SSAB Swedish Steel*, 2010.
- [15] Prospekt Ruukki, Blachy walcowane na gorąco, w arkuszach i kręgach. Blachy pancerne Ramor, *Ruukki*, 2009.
- [16] Prospekt Ruukki, Metal coated steel sheets and coils. Ultra high-strength formable steels Litec, 2009.
- [17] Referencje Ruukki, Wysokowytrzymała stal Optim Ruukki – stal, którą się wybiera, *Ruukki*, 2010.
- [18] Technical Transfer Dispatch, Advanced Vehicle Concept, 6/2001.