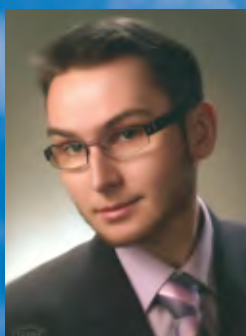


STALE WYSOKOWYTRZYMAŁE W BUDOWIE ŻURAWI SAMOJEZDNYCH ORAZ PRZEŁADUNKOWYCH



MARIUSZ ŁABĘDŹ

Specjalista Urzędzeń
Transportu Bliskiego
Urząd Dozoru Technicznego
Oddział w Krakowie
Biuro w Tamowie

ZAGADNIENIA WYKORZYSTANIA STALI O WYSOKIEJ WYTRZYMAŁOŚCI DLA KONSTRUKCJI URZĄDZEŃ TRANSPORTU BLISKIEGO SĄ PRZEDMIOTEM WIELU BADAŃ INŻYNIERSKICH, A ZA NIMI WDROŻEŃ I ZASTOSOWAŃ W WIELU BRANŻACH GOSPODARKI. WYSOKOWYTRZYMAŁE SPAWALNE STALE UMOŻLIWIAJĄ ISTOTNY WZROST WYDAJNOŚCI WSZELKICH MASZYN ROBOCZYCH M.IN. ŻURAWI CZY ŁADOWAREK. ZASTOSOWANIE STALI HSLA UMOŻLIWIA ZACHOWANIE BEZPIECZEŃSTWA I MOCY URZĄDZENIA PRZY JEDNOCZESNYM ZMNIEJSZENIU WYKORZYSTANEGO MATERIAŁU. W ARTYKULE OMÓWIONE ZOSTAŁY RODZAJE GATUNKÓW STALI STOSOWANYCH W BUDOWIE WYSIĘGNIKÓW ŻURAWI SAMOJEZDNYCH ORAZ PRZEŁADUNKOWYCH. ZAPREZENTOWANO RÓWNIEŻ WYBRANE ZAGADNIENIA DOTYCZĄCE SPAWALNOŚCI TYCHŻE STALI. ARTYKUŁ MOŻE BYĆ POMOCNY DLA PROJEKTANTÓW, SŁUŻB EKSPLOATACYJNYCH ORAZ ZAKŁADÓW UPRAWNIONYCH TRUDNIĄCYCH SIĘ NAPRAWAMI KONSTRUKCJI DŹWIGNIC.



ROZWÓJ STALI KONSTRUKCYJNYCH

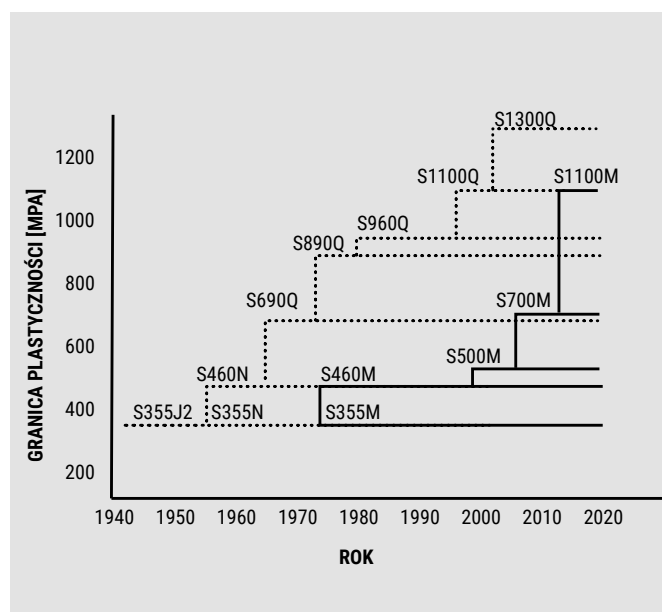
Dynamiczny rozwój przemysłu związanego z budową coraz to większych i bardziej wydajnych maszyn, mający początek w połowie ubiegłego stulecia, wymusił opracowanie nowych materiałów charakteryzujących się większą wytrzymałością przy tej samej masie własnej konstrukcji. Zjawisko to stało się motorem do tworzenia nowatorskich gatunków stali konstrukcyjnych, odznaczających się znacznie wyższymi własnościami wytrzymałościowymi niż stale stosowane tradycyjnie. Etapy rozwoju wybranych gatunków stali konstrukcyjnych przedstawiono na rysunku 1.

W aspekcie budowy żurawi na szczególną uwagę zasługują stale ulepszone cieplnie (Q) oraz stale walcowane termomechanicznie (M). Są to

stale drobnoziarniste niskostopowe. Oznacza się je skrótem HSLA (High Strength Low Alloy). Dzięki zaawansowanemu procesowi ich produkcji uzyskuje się wysoką granicę plastyczności sięgającą 1300 MPa i więcej.

System oznaczania wg normy EN 10025

grupa stali: S – konstrukcyjne	
właściwości fizyczne (gr. 1)	Q – ulepszone cieplnie M – walcowane termomechanicznie N – normalizowane
właściwości fizyczne (gr. 2)	C – do obróbki plastycznej na zimno L – zastosowanie w niskich temperaturach
Liczba w oznaczeniu stali oznacza minimalną wartość granicy plastyczności w MPa dla wyrobu o najmniejszej grubości.	
Przykłady oznaczeń: S690Q, S890QL, S460ML, S700MC, S890M.	



Rysunek 1. Rozwój wybranych gatunków stali konstrukcyjnych [1]

STALE ULEPSZANE CIEPLNIE

Stale ulepszone cieplnie charakteryzują się stosunkowo małą zawartością składników stopowych. Wysokie własności wytrzymałościowe stale te zawdzięczają procesowi ulepszenia cieplnego, w trakcie ich wytwarzania, składającego się z hartowania i odpuszczania.

Powszechnie znane są dwa sposoby produkcji.

- Po standardowym procesie walcowania stal nagrzewana jest do temperatury austenizacji, po czym poddaje się ją szybkiemu chłodzeniu poprzez natrysk strumieni wody. Następnie, w kolejnym piecu stal poddawana jest odpuszczaniu.
- Drugi sposób produkcji polega na bezpośrednim hartowaniu blach z temperatury walcowania, bez powtórnego nagrzewania. Niewątpliwą zaletą drugiej metody jest otrzymanie stali o nieco lepszych własnościach wytrzymałościowych, przy nieznacznie niższej wartości równoważnika węgla.

Po zahartowaniu, w zależności od składu chemicznego stali i szybkości chłodzenia blachy, uzyskuje się strukturę martenzytyczną, martenzytyczno-bainityczną lub bainityczną. Proces odpuszczania stali po hartowaniu ma na celu poprawę własności plastycznych, stabilizację struktury oraz uzyskanie wysokich własności wytrzymałościowych. Najkorzystniejsze własności po odpuszczaniu uzyskuje się w przypadku struktury martenzytycznej [1,2].

Raport Techniczny ISO/TR 15608 przyporządkowuje stale ulepszone cieplnie do grupy 3.

RAPORT TECHNICZNY ISO/TR 15608 „SPAWANIE – WYTYCZNE SYSTEMU PODZIAŁU MATERIAŁÓW METALOWYCH NA GRUPY” TO DOKUMENT WYDANY PRZEZ MIĘDZYNARODOWĄ ORGANIZACJĘ NORMALIZACYJNĄ ISO. ZOSTAŁ ON OPRACOWANY NA POTRZEBY SPAWALNICTWA. RAPORT DOKONUJE PODZIAŁU MATERIAŁÓW METALOWYCH NA GRUPY ORAZ PODGRUPY O PODOBNYCH CHARAKTERYSTYKACH METALURGICZNYCH I SPAWALNICZYCH.

Prekursorami w produkcji tego rodzaju stali były Japonia – stal HT80 oraz USA – stal Caqueriloy T1. W ZSRR opracowano stal o porównywalnych własnościach – 15GSM-FR, której późniejszym odpowiednikiem była produkowana w Hucie Stalowa Wola, najpierw w oparciu o wytyczne Instytutu Metalurgii Żelaza, a później o BN-84/0642-45 stal o oznaczeniu 14HNMCu o własnościach porównywalnych z obecnie produkowaną stalą konstrukcyjną S690Q. Norma DIN 15018-3 dopuszczała w tamtym czasie stosowanie stali StE690 przy obciążeniu zmiennym, przy założeniu liczby cykli nie przekraczającej wartości $N_c=5 \cdot 10^4$. Późniejsze prace metalurgów zaowocowały powstaniem całej gamy dostępnych dziś stali ulepszanych cieplnie.

STALE WALCOWANE TERMOMECHANICZNIE

Zwiększenie wytrzymałości, plastyczności i udarności stali walcowanych termomechanicznie w stosunku do typowych stali C-Mn uzyskuje się przez dodanie niewielkiej ilości pierwiastków stopowych (V, Nb, Ti) oraz zastosowaniu odpowiedniej obróbki cieplno-plastycznej (termomechanicznej).

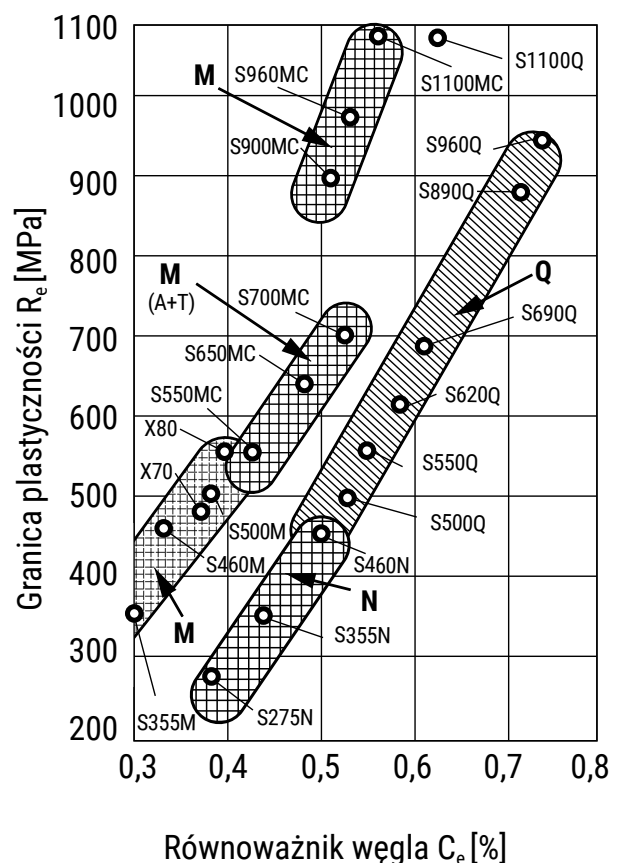
Obróbka termomechaniczna polega na kontrolowanym walcowaniu w określonym zakresie temperatury i stosowaniu po nim zabiegów cieplnych. Proces walcowania przebiega dwustopniowo. Walcowanie wstępne odbywa się w temperaturze niższej o ok. 100–150°C od temperatury walcowania konwencjonalnego, natomiast walcowanie końcowe prowadzone jest w temperaturach nieco powyżej A_{c3} , tj. w dolnym zakresie występowania austenitu, bez rekrytalizacji ziaren. W efekcie uzyskuje się strukturę drobnoziarnistego austenitu o dużej gęstości dyslokacji i o dużej liczbie zarodków powstawania nowych składników strukturalnych. Chłodzenie po walcowaniu może być prowadzone w powietrzu lub strumieniem wody (M+AC). Przy chłodzeniu wodą uzyskuje się strukturę drobnoziarnistego ferrytu

oraz bainitu, a nawet niskowęglowego martenzytu. Zastosowanie walcowania z przyspieszonym chodzeniem (strumieniem wody) umożliwia uzyskanie stali o granicy plastyczności do ok. 700 MPa. Dodatkowe zastosowanie ulepszania cieplnego stali pozwala na podwyższenie R_e do ok. 1100 MPa [1]

Raport Techniczny ISO/TR 15608 przyporządkowuje stale walcowane termomechanicznie do grupy 2.

Stali walcowanych termomechanicznie nie należy stosować do produkcji elementów konstrukcji wymagających kształtowania na gorąco lub pracujących w podwyższonych temperaturach, ponieważ stan umocnienia stali zostałby zniweczony.

Ze względu na złożoność procesu produkcji stale walcowane termomechanicznie upowszechniły się nieco później niż stale normalizowane czy też stale ulepszone cieplnie. Duże zasługi w początkowej fazie rozwoju tych stali położyli Japończycy, eksperymentując z zabiegami regulowanego walcowania. Technologia produkcji stali bezustannie rozwija się. Od kilku lat dostępne są na rynku gatunki stali walcowanych termomechanicznie o R_e powyżej 1000 MPa.



Rysunek 2. Zależność między równoważnikiem węgla C_e a granicą plastyczności R_e dla stali:

- N – stale normalizowane lub walcowane normalizująco
- M – stale walcowane termomechanicznie
- Q – stale ulepszone cieplnie [1]

ZASTOSOWANIE STALI WYSOKOWYTRZYMAŁYCH W BUDOWIE ŻURAWI

Stale wysokowytrzymałe znajdują zastosowanie w budowie odpowiedzialnych konstrukcji spawanych. Stosuje się je m.in. w produkcji urządzeń ciśnieniowych, obudów górniczych, konstrukcji mostów, konstrukcji i szkieletów stalowych o dużych wysokościach, elementów ciężkich maszyn do robót ziemnych jak i elementów dźwignic.



W przypadku urządzeń dźwignicowych stale ulepszone cieplnie oraz stale walcowane termomechanicznie znalazły zastosowanie głównie jako materiał służący do budowy wysięgników, niektórych elementów nadwozia i ram obrotowych.

W porównaniu ze zwykłymi stalami konstrukcyjnymi ich zastosowanie umożliwia znaczne zmniejszenie wymiarów geometrycznych wraz z masą wysięgnika, tym samym zapewnia obniżenie wypadkowego środka ciężkości pracującej dźwignicy, co z kolei pozytywnie wpływa na jej stateczność.

Wykazano również, że zastosowanie stali wysokowytrzymałych obniża jednostkowy koszt produkcji konstrukcji nośnej żurawia poprzez zmniejszenie sumarycznych kosztów zastosowanego materiału, a także kosztów spawania za sprawą zmniejszenia grubości ścianek i objętości spoin [1,6,7].

Opracowana niegdyś polska norma PN-79/M-06515 w zakresie projektowania ustrojów nośnych dźwignic dawała możliwość stosowania wspomnianej wcześniej stali ulepszonej cieplnie o oznaczeniu 14HNMBCu ($R_e = 690$ MPa), jako materiału o najwyższych własnościach wytrzymałościowych. Już w latach siedemdziesiątych ubiegłego stulecia stal ta lub jej odpowiedniki były powszechnie wykorzystywane do budowy wysięgników teleskopowych żurawi samojezdnych. Za przykład mogą posłużyć żurawie Hydros T-351 Huta Stalowa Wola, DST-0401 Bumar-Łabędy Gliwice, DST-0203 Famaba Głogów czy KC-6471 WTF Krajan Odessa. Niektóre egzemplarze tych dźwignic są wykorzystywane do dziś.

Obecnie wskazówki dotyczące rodzajów materiałów stosowanych do budowy dźwignic znajdujemy w wielu normach lub specyfikacjach np. FEM5.004, FEM1.001, PN-EN 13001-3-1. Ta ostatnia, w zakresie stali ulepszanych cieplnie oraz stali walcowanych termomechanicznie, przywołuje wymagania norm PN-EN 10025-6, PN-EN 10025-4, PN-EN 10149-2, które traktują o gatunkach z zakresu (S355) S460-S960. Natomiast najnowsze wydanie normy PN-EN 13000 (żurawie samojezdne) dodatkowo poszerza ten katalog o stal S1100Q.

Wysięgniki nowoczesnych żurawi samojezdnych wiodących producentów, konstruowane są z coraz to bardziej wyszukanych materiałów. Stale wysokowytrzymałe wykorzystywane do ich budowy to przykładowo gatunki S690QL1, S700MC, S890QL1, S960QL, S960MC a nawet S1100QL.

Ponadto, stale ulepszone cieplnie, jak i walcowane termomechanicznie, znajdują dziś coraz szersze zastosowanie w budowie innych dźwignic, w których do tej pory nie były stosowane. Są one wykorzystywane do budowy bardzo dużych i mocno wyłożonych wysięgników żurawi przeładunkowych, budowanych przynajmniej po części w oparciu o normę PN-EN 12999.



Otóż, na uwagę zasługuje fakt, iż w Europie zachodniej daje się zauważyć pewien trend polegający na zastępowaniu niezgrabnych mniejszych żurawi samojezdnych, dużymi żurawiami przeładunkowymi o udźwigach rzędu 30–35 ton i więcej. W tym przypadku budowanie wysięgników ze stali wysokowytrzymałych staje się koniecznością. Z materiałowego punktu widzenia jest to dziś zjawisko stosunkowo nowe i dynamicznie rozwijające się.

SPAWALNOŚĆ STALI ULEPSZANYCH CIEPLNIE ORAZ STALI WALCOWANYCH TERMOMECHANICZNIE

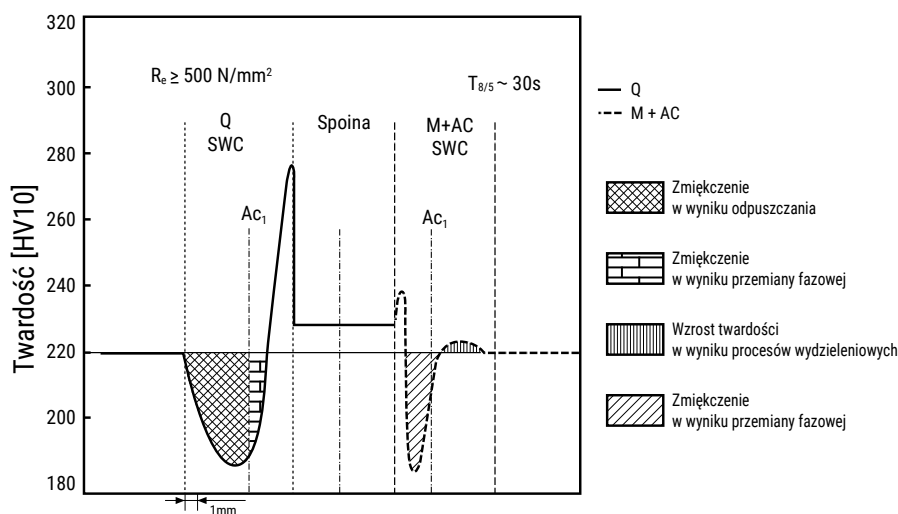
Z jednej strony, ze względu na posiadaną strukturę i osiągnięte wyższe wartości równoważnika węgla (rys. 2.) stale ulepszone cieplnie (Q) ulegają większemu utwardzeniu w strefie wpływu ciepła, i tym samym wymagają ścisłego przestrzegania zasad spawania zapobiegających powstawaniu pęknięć zimnych.

Z drugiej strony, na skutek spawania ze zbyt dużymi energiami liniowymi dochodzi do zniweczenia skutków procesu ulepszenia cieplnego materiału, co w konsekwencji prowadzi do spadku własności wytrzymałościowych w SWC. Przyczyną powstawania obszarów o zmniejszonej mikrostrukturze po spawaniu, jest przede wszystkim lokalne odpuszczenie (rys. 3.). Spawanie przy ograniczonej energii liniowej łuku powoduje, że obszar ten jest akceptowalnie wąski.

Zalecenia technologiczne spawania stali ulepszone cieplnie przewidują więc precyzyjne ustalenie i rygorystyczne utrzymanie w czasie spawania energii liniowej łuku. Stale te wymagają stosowania niskowodorowych procesów spawalniczych oraz podgrzewania wstępnego. Materiały dodatkowe należy dobierać ze świadomością, że spoina nie będzie poddawana ulepszeniu cieplnemu, tak więc jej skład chemiczny powinien być bogatszy od składu chemicznego materiału rodzimego. Jako obróbkę cieplną złączy spawanych można przeprowadzić wyżarzanie odpężające, oczywiście w temperaturze niższej od temperatury odpuszczania stali, celem nie doprowadzenia do spadku własności wytrzymałościowych konstrukcji spawanej. Z tego samego powodu nie należy odkształconych elementów konstrukcji poddawać procesowi prostowania ogniowego.

Natomiast stale walcowane termomechanicznie (M) charakteryzują się niższym równoważnikiem węgla niż stale normalizowane (N) oraz stale ulepszone cieplnie (Q) o tym samym poziomie granicy plastyczności (rys. 2.) i tym samym odznaczają się lepszą spawalnością. Wyraźnie mniejsze jest utwardzenie w SWC stali walcowanych termomechanicznie z przyspieszonym chłodzeniem (M+AC) niż stali ulepszone cieplnie. W związku z mniejszą skłonnością do powstawania pęknięć zimnych stale po obróbce termomechanicznej wymagają niższych temperatur podgrzewania wstępnego (o ile w ogóle wymagają) niż stale ulepszone cieplnie o porównywalnej granicy plastyczności.

Analogicznie jak w przypadku wykonywania złączy ze stali ulepszone cieplnie, w SWC złączy spawanych ze stali walcowanych termomechanicznie może wystąpić obszar o obniżonej twardości w stosunku do materiału rodzimego, a tym samym o nieco obniżonych własnościach wytrzymałościowych (rys. 3.). Jednak przy właściwie dobranych parametrach spawania, mała szerokość tego obszaru zwykle nie ma istotnego wpływu na własności wytrzymałościowe złączy.



Rysunek 3. Schemat rozkładu twardości w złączy spawanym ze stali o $R_e \geq 500$ MPa w stanie ulepszonym cieplnie (Q) i stali po walcowaniu termomechanicznym z przyspieszonym chłodzeniem (M+AC) [4]

Materiały dodatkowe do spawania stali walcowanych termomechanicznie, w celu zapewnienia własności wytrzymałościowych spoin odpowiadających własnościom stali, powinny mieć więk-

szą zawartość składników stopowych niż materiał rodzimy. Zalecane jest stosowanie procesów niskowodorowych.

Należy również zauważyć, że w przypadku stali o wysokich własnościach wytrzymałościowych skłonnych do pęknięcia zimnego szczególne znaczenie ma dyfuzja wodoru w funkcji czasu. Z tego powodu zaleca się, aby badania NDT złączy przeprowadzać po upływie 48 godzin od zakończenia procesu spawania. Wymagania takie narzuca np. norma PN-EN 1090-2.

Zastosowanie wysokowytrzymałych stali (HSLA) na konstrukcje pracujące pod obciążeniem zmiennym wymaga też pilniejszego pochylenia się nad zjawiskiem zmęczenia materiału. W aspekcie spawalności jest to o tyle istotne, iż możliwym jest zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej złączy spawanych. Przykładowo, udowodniono, że wytrzymałość zmęczeniowa złącza spawanego ze stali S690Q (określana dla 10^5 cykli) wzrosła o 38% po zastosowaniu metody przetapiania łukiem TIG, o 31% po szlifowaniu przejścia oraz o średnio 33% po przeprowadzeniu obróbki ultradźwiękowej [1]. Należy pamiętać, że im wyższe są własności wytrzymałościowe stali, tym konstrukcja jest bardziej wrażliwa na działanie karbu konstrukcyjnego podczas pracy.

Literatura:

1. Brózda J., Jachym R., Kwieciński K., Łomozik M., Węglowski M.S.: Stale konstrukcyjne i ich spawalność. Wydawnictwo Instytutu Spawalnictwa, Gliwice 2017.
2. Butnicki S.: Spawalność i kruchość stali. WNT, Warszawa 1991.
3. Ferenc K., Ferenc J.: Konstrukcje spawane. WNT, Warszawa 2000.
4. Tasak E., Ziewiec A.: Spawalność materiałów konstrukcyjnych. Tom I. Wydawnictwo JAK, Kraków 2009.
5. Poradnik inżyniera. Spawalnictwo. WNT, Warszawa 2003.
6. Karcz R., Kwiecień S., Godniak M., Jastrzębski R.: Spawanie stali wysokowytrzymałych cz. II. Projektowanie i konstrukcje inżynierskie. Wrzesień 2013.
7. Kretz T.: Les aciers à Haute Limite d'Elasticité. AFGC. Październik 2012.
8. Katalogi i materiały producentów: HSW, Bumar-Łabędy, Famaba Głogów, Coles, WTF Krajan, Liebherr-Werk Ehingen, Terex-Demag, Manitowoc, Palfinger, Hiab, Fassi, Effer, Böhler, SSAB, Thyssenkrupp.