

WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWE, PROJEKTOWE I TECHNOLOGICZNE STALI KONSTRUKCYJNYCH KLASYFIKOWANYCH WEDŁUG OBOWIĄZUJĄCYCH NORM I STOSOWANYCH W BUDOWIE MASZYN

FUNCTIONAL, DESIGN AND TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF CONSTRUCTIONAL STEELS CLASSIFIED ACCORDING TO CURRENT STANDARDS AND USED IN MECHANICAL ENGINEERING

Maciej B. Lachowicz, Marzena M. Lachowicz - Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, Politechnika Wrocławska

W artykule omówiono trzy gatunki stali konstrukcyjnych S235, P265GH i Weldom700 (S690Q) produkowanych w oparciu o nowe normy. Materiały pochodziły z eksploatowanych elementów konstrukcji nośnych, maszyn i urządzeń energetycznych. Stwierdzono, że pomimo spełnienia wymagań sprecyzowanych w normach badane stale mogą wykazywać silne różnice pod względem mikrostruktury, składu chemicznego i właściwości mechanicznych. Rozbieżności te wynikają z nieprecyzyjnych zapisów norm, a jednocześnie mogą powodować trudności technologiczne oraz prowadzić do zagrożeń podczas eksploatacji maszyn i urządzeń.

Słowa kluczowe: konstrukcja maszyn, stal konstrukcyjna, S235, P265GH, Weldom 700

The paper three types of construction steels S235, P265GH and Weldom700 (S690Q) produced according to the new standards was presented. The materials came from the exploited elements of the supporting structures, machines and power equipments. It was found that the tested steels meet the standards but, it can show strong differences in microstructure, chemical composition and mechanical properties. These differences were the result of the unclear wording of the standards and it can cause technological problems and hazard during the operation of the machines and equipment.

Key words: machine construction, constructional steel, S235, P265GH, Weldom 700

Wstęp

W konstrukcjach maszyn, urządzeń oraz ustrojów nośnych, a także budownictwie od lat stosowane są stale konstrukcyjne. W praktyce inżynierskiej na elementy o niewielkim wyężeniu i niewielkiej odpowiedzialności inżynierowie stosowali stale niestopowe podstawowe gatunków St3S, St4S, a w elementach mocniej obciążonych prym wiodła stal niskostopowa 18G2A. Podział zastosowania stali w zależności od obciążenia i odpowiedzialności konstrukcji był sztuczny i wielokrotnie w elementach, których awaria mogła doprowadzić do katastrofy stosowano stal St3S lecz w znaczący sposób przewymiarowywano konstrukcję. Analizując maszyny lub urządzenia zbudowane w latach 1960-1970 wielokrotne, ponowne obliczenia wytrzymałościowe prowadzone metodą MES pozwoliły stwierdzić, że wyężenie konstrukcji jest na poziomie 60-80 MPa, gdzie granica plastyczności stali St3S wynosiła 240 MPa. Obecnie wielu inżynierów oraz młodych absolwentów studiów mechanicznych zwłaszcza o specjalności zarządzania produkcją jak również przedsiębiorców stwierdziłoby, że tak zaprojektowane konstrukcje są złe, nieekonomiczne i niewłaściwie zoptymalizowane. Taki pogląd w odczuciu autorów jest błędny ponieważ jak można tak twierdzić, jeżeli np. podczas modernizacji młynów do mielenia cementu o masie ponad 200 ton i wirujących z prędkością 700 obr./min, zbudowanych w latach 70. ze stali St3S stwierdzono ponad 300 spoin naprawczych, wykonanych przez te lata na płaszczu młyna. Kontrola młyna prowadzona była co

2-3 miesiące i kolejne pojawiające się pęknięcia były naprawiane. Przez ponad 40 lat pęknięcia płaszcza młyna nie powodowały żadnego zagrożenia konstrukcji, a po tym okresie eksploatacji urządzenie zostało zmodernizowane i wyposażone w nowe napędy i jest eksploatowane nadal. Takich przykładów można przytaczać dziesiątki, opierając się zwłaszcza na elementach pochodzących przede wszystkim z dużych i odpowiedzialnych urządzeń i konstrukcji. Takie zachowanie eksploatacyjne tych maszyn wynika z właściwie „zaprojektowanej” stali, która pomimo stosunkowo niskich właściwości wytrzymałościowych posiadała stale i niezmiennie cechy dotyczące przedziałów wytrzymałości, odkształcenia plastycznego, składu chemicznego i mikrostruktury. Stabilność tych cech stali powodowała, że wykazywały one stałą jakość, niezależnie od postaci dostarczenia, wyrobu i jego grubości, a dzięki temu stale te były przewidywalne. Oczywiście niektórzy inżynierowie mogą stwierdzić, że stale te były tak proste, że trudno byłoby je zepsuć na etapie wytwarzania. Jednak na obecnym etapie rozwoju inżynierii i metalurgii jakość stali pomimo zaawansowania produkcji, wdrożonych systemów zarządzania nie tylko się pogorszyła ale również w bardzo dużym stopniu stanowi zagrożenie dla tworzonych konstrukcji.

Cel badań

Niniejsze opracowanie nie jest krytyką innowacji lecz powinno być traktowane jako studium przypadku, mające na celu uświadomienie zagrożeń wynikających z niewłaściwie wg

autorów sprecyzowanych warunków odbioru i wytwarzania nowoczesnych stali konstrukcyjnych. Według obowiązujących norm stale konstrukcyjne są klasyfikowane w pierwszej kolejności na podstawie właściwości mechanicznych: wytrzymałości na rozciąganie - R_m , granicy plastyczności R_e lub $R_{p0,2}$, wydłużenia A oraz dla niektórych gatunków norma precyzuje udarność w temperaturze otoczenia oraz obniżonej. Taka klasyfikacja wynika z tego, że inżynier konstruktor podczas procesu projektowania dobiera materiał oraz przekroje nośne maszyny operując powyższymi parametrami.

Kryterium znakowania stali opiera się na minimalnej granicy plastyczności R_e i niestety ta wartość jest w normach podana jako minimalna. I tak np. dla stali S235 minimalne R_e wynosi 235 MPa. Również odkształcenie A podawane jest jako wartość minimalna, co dla konstruktora nie ma w praktyce większego znaczenia, jeżeli jest ono większe od wartości minimalnej. Jedynie wytrzymałość na rozciąganie określone jest przedziałem wytrzymałości i np. dla stali S235 wynosi od 360 do 510 MPa.

Parametry te wydają się nie budzić żadnych zastrzeżeń, jednak pominięty jest bardzo istotny fakt, że takie sprecyzowanie kryteriów pozwala wytwarzać stal, w której granica plastyczności R_e jest sprowadzona do wytrzymałości na rozciąganie. Uczona i przytaczana w wielu podręcznikach akademickich zależności pomiędzy R_e a R_m definiowana jako $R_e = 0,65 R_m$ w wielu obecnie produkowanych stalach konstrukcyjnych nie istnieje [1,2]. A już kuriozalne są przypadki gdy stosunek R_e/R_m wynosi 1. Również wykres rozciągania tych stali w żaden sposób nie przypomina uczonego wykresu rozciągania materiału konstrukcyjnego. Przytoczone zależności z pozoru wydające się jako kolokwialne, akademickie i nieprzystające do nowoczesnego projektowania maszyn. Są jednak fundamentalne ze względu na bezpieczeństwo eksploatacji konstrukcji.

Często w praktyce inżynierskiej producenci stali podają argument, że materiał posiada znacznie wyższą granicę plastyczności niż wymagana normą i z tego względu jest on lepszy. Jeżeli więc z obliczeń wynika, że wystarczający jest materiał o R_e minimum 235 MPa a zastosowana stal ma np. 400 MPa to znaczy, że konstrukcja jest dwukrotnie przewymiarowana. Cóż się jednak stanie gdy wytrzymałości na rozciąganie tego materiału wynosi np. 420 MPa. Przy wystąpieniu jakiegokolwiek przeciążenia do momentu uzyskania 420 MPa konstrukcja pracuje tylko i wyłącznie w zakresie sprężystym i przeciążenie nie jest sygnalizowane żadnym odkształceniem plastycznym, a po osiągnięciu wartości 420 MPa konstrukcja nieuchronnie ulegnie zniszczeniu.

Kolejnym unormowanym kryterium stali konstrukcyjnych jest skład chemiczny, a upraszczając sprawę możliwy jest brak jakichkolwiek dodatków normalnych oraz stopowych. Wynika to z faktu, że obecnie stale konstrukcyjne sprecyzowaną mają jedynie maksymalną zawartość pierwiastków. Umożliwia to producentom dowolny dobór ilości wprowadzanych pierwiastków stopowych. Według obowiązujących norm zasadniczo możliwa jest sytuacja, sklasyfikowania niemal czystego żelaza jako stali konstrukcyjnej, oczywiście pod warunkiem, że materiał spełni minimalne właściwości wytrzymałościowe. Wydawać by się mogło, że taka dowolność składu chemicznego nie powinna wprowadzać żadnych problemów. Co więcej, niska zawartość pierwiastków stopowych może być bardzo korzystna, zwłaszcza ze względu na spawalność. Norma precyzuje, że skład chemiczny stali powinien być tak dobrany aby równoważnik

węgla ekwiwalentnego C_E był mniejszy od 0,45% [3,4]. Prawdopodobnie, gdyby ten zapis normy był właściwie rozumiany stale konstrukcyjne klasyfikowane wg obowiązujących norm byłyby materiałem doskonałym pod względem spawalności, jednak tak nie jest. Podanie w normach jedynie maksymalnych zawartości pierwiastków spowodowało zupełną dowolność w produkcji stali i systemów jej umacniania. Niestety z praktyki inżynierskiej wynika, że obecnie zamawiając wyroby ze stali gatunku np. S235 w zależności od wyrobu i jego grubości otrzymujemy stale o różnym składzie chemicznym oraz mikrostrukturze. W zależności od postaci wyrobu i jego grubości producent w dowolny sposób umacnia stal poprzez wprowadzenie pierwiastków stopowych, albo przez przeróbkę plastyczną lub poprzez kształtowanie mikrostruktury zabiegami obróbki cieplnej jak w przypadku stali AHSS [5]. Niestety, takie praktyki stanowią ogromne utrudnienie technologiczne i eksploatacyjne. Spawanie stali niby tego samego gatunku ale o różnym składzie chemicznym jest utrudnione ze względu na właściwy dobór spoiwa i parametrów cieplnych procesu. Przecież nie trudno sobie wyobrazić, że podczas spawania następuje dyfuzja pierwiastków w obszarze spoiny i niema żadnych hamulców aby np. mangan, chrom lub węgiel dyfundował i powodował wzrost hartowności a w następstwie pęknięcia na zimno. Współczynnik C_E zawiera szereg pierwiastków stopowych a producent tak dobiera skład aby spełnić warunek $C_E \leq 0,45\%$, uzyskując to poprzez rozsadę ilości pierwiastków stopowych. Łącząc więc stale, z których jedna ma mniejszą zawartość węgla a zwiększoną zawartość np. manganu i chromu ze stalą o odwrotnym stosunku tych pierwiastków w spoinie i strefie wpływu ciepła w wyniku dyfuzji może nastąpić lokalny wzrost współczynnika C_E powyżej wartości 0,45%.

Różne składy chemiczne materiałów silnie wpływają również na spadek odporności korozyjnej podczas eksploatacji. W momencie metalicznego połączenia poprzez spawanie lub w momencie styku materiałów o różnych składach chemicznych tworzą się pary korozyjne mogące sprzyjać korozji elektrochemicznej [6].

Materiały badawcze

W pracy przedstawiono wyniki badań trzech stali konstrukcyjnych: S235, P265GH i Weldox 700, które były eksploatowane w maszynach wiertniczych, giętych elementach kratownicy i kotłach energetycznych. Według obecnie obowiązujących norm wcześniej wspomniane stale starego gatunku St3S są znakowane jako S235 wg PN-EN 10025-2:2007. Stal P265GH jest stalą konstrukcyjną do pracy w temperaturze podwyższonej wg PN-EN 10028-2. Stal występująca pod handlową nazwą Weldox 700 jest nowoczesną stalą konstrukcyjną o podwyższonej wytrzymałości z grupy stali HSS i AHSS (Advanced High Strength Steel). Według normy PN-EN 10025-6 stal tę można zaliczyć do stali gatunku S690Q [5-7].

Badania obejmowały obserwacje makroskopowe oraz mikroskopowe z zastosowaniem mikroskopii świetlnej oraz skaningowej, pomiary twardości, a także próby wytrzymałościowe materiałów bazowych oraz połączeń spawanych. W badaniach mikroskopowych stosowano mikroskop świetlny Nikon MA200 oraz mikroskop skaningowy JEOL JSM-5800LV-Oxford LINK ISIS-300. Pomiary twardości wykonano urządzeniem Zwick-Roell ZHV30. Analizę składu chemicznego przeprowadzono metodą grawimetryczną oraz spektralną, stosując analizator

Leco GDS800. Właściwości wytrzymałościowe określono w statycznej próbie rozciągania, którą przeprowadzono zgodnie z normą z PN-EN 10002. Stosowano maszynę wytrzymałościową model INSTRON 1126 oraz zakres pomiarowy: 0 – 100kN, działka elementarna wynosiła 1kN. Urządzenie posiada świadectwo wzorcowania wydane przez laboratorium wzorcujące akredytowane przez PCA. Obróbkę statystyczną wyników prowadzono z zastosowaniem rozkładu T-Studenta.

Wyniki badań

Stal S235

Stal konstrukcyjna S235 jest odpowiednikiem dawniej stosowanych stali niestopowej konstrukcyjnej ogólnego przeznaczenia gatunku St3S. Stal St3S charakteryzowała się mikrostrukturą ferrytyczno-perlityczną i wg zastąpionej normy PN-88/H-84020 powinna wykazywać następujące właściwości wytrzymałościowe:

granice plastyczności R_e od 185 do 235 MPa,
wytrzymałość na rozciąganie R_m od 340-520 MPa,
wydłużenie A_5 od 19 do 26%.

Stal S235 według normy PN-EN 10025-2:2007 dla wyrobów o grubości od 3 mm powinna wykazywać:

R_e minimum 235 MPa,
 R_m od 360 MPa do 510 MPa
wydłużenie A minimum 26%

Jak wynika z powyższych wymagań podstawowa różnica pojawia się w granicy plastyczności i wydłużeniu. Wydłużenie ponad 26% jest z punktu widzenia bezpieczeństwa konstrukcji bardzo pożądane, jednak określenie jedynie minimalnej granicy plastyczności prowadzi do wytworzenia materiału, w którym może nie istnieć zapas naprężenia oraz odkształcenia plastycznego pomiędzy R_e a R_m . Po przekroczeniu więc naprężeń dopuszczalnych konstrukcja nie będzie się odkształcać plastycznie, sygnalizując tym samym przeciążenie, a jednocześnie obsługa techniczna nie będzie mogła zauważyć przeciążenia konstrukcji. W badanym przypadku taka sytuacja zaistniała podczas przeciążenia elementów kratownicy. W wyniku badań rur wykonanych ze stali gatunku S235JR stwierdzono, że pod względem składu chemicznego stal może być zakwalifikowana do stali S235JR jednak zawartości pierwiastków stopowych bardzo znacznie odbiegają od wartości podanej w normie PN-EN 10025-2:2007. Skład chemiczny materiału był zbliżony do stali niskowęglowych, nieuspokojonych, przeznaczonych do obróbki plastycznej na zimno np. DC04, DC05 [5].

W tabeli 1 zestawiono skład chemiczny badanej stali oraz dla porównania skład stali S235 wg PN-EN 10025-2:2007 i DC04 wg PN-EN 10130:2009. Zasadniczo badana stal S235 wykazuje skład niemal czystego żelaza umocnionego manganem. W rzeczywistości jest to ferryt umocniony roztworowo manganem co potwierdziły badania metalograficzne ujawniając, że osnowę stali stanowi jedynie ferryt. Mikrostrukturę stali pokazano na rys. 1.

W wyniku przeprowadzonych badań wytrzymałościowych stwierdzono, że badana stal nie wykazuje wyraźnej granicy plastyczności R_e oraz wykresu rozciągania charakterystycznego dla stali konstrukcyjnych. Materiał rury jest tak umocniony, że zasadniczo granica plastyczności R_e oraz wytrzymałość na rozciąganie R_m są sprowadzone do jednego punktu a więc $R_e \approx R_m$. Nie można również wyznaczyć umownej granicy plastyczności $R_{p0,2}$, która jest wymagana normą PN-EN 10025-2:2007 (na-

prężenie odpowiadające odkształceniu na poziomie 0,2%). W przypadku próby wyznaczenia umownej granicy plastyczności $R_{p0,2}$ wypadła ona już na prostoliniowym odcinku wykresu, w którym materiał płynie już plastycznie do zerwania a naprężenie maleje. Przykładowy, uzyskany w próbach rozciągania wykres pokazano na rysunku 2. Kształt wykresu całkowicie odbiega od przyjętego zachowania się stali konstrukcyjnych, a warunek $R_e = 0,65R_m$ oczywiście nie jest spełniony.

Takie zachowanie stali wywiera silny wpływ nie tylko na bezpieczeństwo konstrukcji ale również na technologie wytwarzania. Od wielu lat producent elementy kratownicy wykonywał z rur giętych ze stali St3S, a kąty gięcia wynosiły do 115°. W przypadku dostarczenia badanej stali maksymalny kąt gięcia możliwy do uzyskania bez spłaszczenia rury wynosił 85°. Jest to właśnie wynikiem wysokiej granicy plastyczności i braku odkształceń plastycznych pomiędzy R_e a R_m .

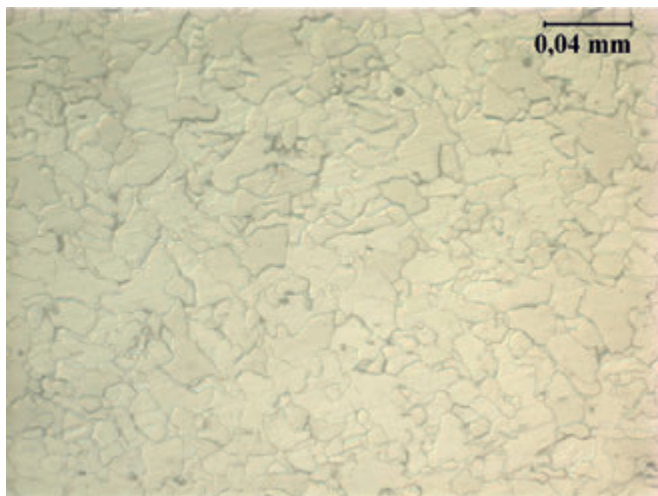
Analizując wyniki prób wytrzymałościowych wydaje się, że w przypadku badanej stali minimalna wytrzymałość na rozciąganie wynosi 341 MPa, a więc spełnia wymagania normy. Jednak uwzględniając przedział ufności do wartości średniej okazuje się, że R_m tak naprawdę mieści się pomiędzy 321 MPa a 399 MPa. Określone w próbie właściwości mechaniczne zestawiono w tabeli 2. Niestety, nowa norma PN-EN 10025-2:2007 dotycząca stali konstrukcyjnych niby rozgranicza naprężenie odpowiadające granicy plastyczności R_e oraz wytrzymałość na rozciąganie R_m . Jednak określenie jedynie dolnej wymaganej wartości R_e umożliwia tak naprawdę sprowadzenie R_e do R_m . Pod tym względem wymagania dotyczące R_e zastąpionej polskiej normy PN-88/H-84020 były właściwie sformułowane, poprzez podanie zakresu wytrzymałości.

Podobna sytuacja występuje z odkształceniem i pomimo tego, że w każdej próbie przekracza ono 26% to jednak bardzo duży przedział ufności sugeruje, że statystycznie wartości mierzone odkształcenia mieszczą się w przedziale od około 20% do 45%.

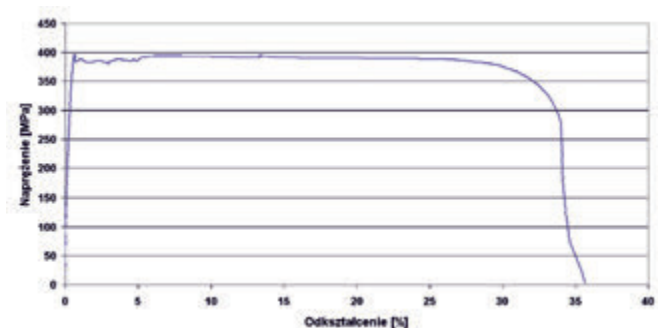
Tab. 1. Skład chemiczny badanej stali S235.

Tab. 1. Chemical composition of the examined S235 steel.

Lp	Pierwiastek [% wag.]	Badana stal S235	Stal S235 wg PN-EN 10025-2	Stal DC04 wg PN-EN 10130
1	C	0,04	max 0,2	max 0,08
2	Si	0,04	--	--
3	Mn	0,79	max 1,4	max 0,4
4	P	0,005	max 0,04	max 0,03
5	S	0,004	max 0,04	max 0,03
6	Cr	0,02		
7	V	0,005		
8	Cu	0,01		
9	Co	0,01		
10	Al	0,04		
11	Mo	0,002		
12	Ni	0,01		
13	V	0,005		
14	W	0,01		
15	Fe	reszta	reszta	reszta



Rys. 1. Mikrostruktura ferrytyczna badanej stali S235. Trawiono Mi1Fe
Fig. 1. Ferritic microstructure of the examined S235 steel. Etched with Mi1Fe



Rys. 2. Wykres rozciągania uzyskany dla stali S235
Fig. 2. Strength diagram of the examined S235 steel

Tab. 2. Właściwości wytrzymałościowe badanej stali S235
Tab. 2. Mechanical properties of the examined S235 steel

Parametr	Oznaczenie próbki			Wartość średnia
	1	2	3	
$R_{p0,2}$ (MPa)	--	--	--	--
R_m (MPa)	341	397	350	360 ± 39
A_{50} (%)	26,9	35,7	35,4	$32,67 \pm 12,41$
Wartości minimalne wg PN-EN 10025-2				
$R_{p0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)		A_{50} (%)	
min. 235	360-510		min. 26	

Stal P265GH

Stal P265 wg PN-EN 10028-2 jest stalą do pracy przy podwyższonej temperaturze. Nie należy ona do grupy stali żaroodpornych oraz żarowytrzymałych. Stale oznaczane literą P mogą pracować przy niewielkich obciążeniach wytrzymałościowych w temperaturach do 450°C, zapewniając dobrą odporność na korozję w temperaturze podwyższonej. Stale te są również przeznaczone na urządzenia ciśnieniowe.

Stale przeznaczone do pracy w temperaturze podwyższonej gatunku np. P265 mają sprecyzowane w normie PN-EN 10028-2 również właściwości wytrzymałościowe określone w temperaturach podwyższonych od 50°C do 400°C oraz wytrzymałość na pełzanie do temperatur 440°C w czasie 100 000 godzin i

200 000 godzin. Producent stali musi do atestu dołączyć świadectwo kontroli właściwości w temperaturze podwyższonej. Niestety, podobnie jak dla podstawowych stali konstrukcyjnych, norma nieściśle precyzuje wymagania. W rzeczywistości producenci niemal każdą stal konstrukcyjną mogą znakować jako do pracy w temperaturze podwyższonej. Norma wprawdzie nakazuje dołączyć atesty z badań w temperaturze podwyższonej lecz bez żądania tych dokumentów przez zamawiającego nie są one dostarczane. Dodatkowo zamawiający i tak najczęściej nie jest w stanie zweryfikować własnymi badaniami właściwości w temperaturach podwyższonych.

Również skład chemiczny jest niewłaściwie lub nawet należy stwierdzić, że źle sprecyzowany w przedmiotowej normie. Norma PN-EN 10028-2 określa zawartość pierwiastków zwiększających odporność na utlenianie, przyczepność tlenków do powierzchni i stabilność właściwości w temperaturze podwyższonej, podając zależność:

$$\text{Cr} + \text{Cu} + \text{Mo} + \text{Ni} \leq 0,7\%$$

Analizując tę nierówność należy stwierdzić, że norma w zasadzie nic nie określa i stosując tylko stop żelaza i węgla bez jakichkolwiek dodatków stopowych wymagania normy są spełnione. Nie wiadomo dlaczego w normie znalazł się zapis, że ilość pierwiastków ma być mniejsza lub równa 0,7. Wydaje się, że prawidłowo powinien być podany przedział zawartości pierwiastków.

Obiektem badawczym ze stali P265GH był element kotła o mocy 1MW. W wyniku badań mikroskopowych stwierdzono, że mikrostruktura jest ferrytyczno-perlityczna wykazująca silną pasmowość w kierunku przeróbki plastycznej.

Silna pasmowość pierwotna świadczy, że stal prawdopodobnie nie była poddana normalizowaniu lub była normalizowana niewłaściwie. Według zaleceń normy PN-EN 10028-2 stal gatunku P265GH jest dostarczana po normalizowaniu lub po walcowaniu na gorąco, jeżeli temperatura walcowania mieściła się w zakresie 1100-850°C.

Na podstawie tylko badań mikroskopowych należy stwierdzić, że badana stal P265 nie odpowiada wymaganiom dla tego gatunku stali ale mikrostruktura pasmowa byłaby dopuszczalna w stali konstrukcyjnej S265. Mikrostrukturę badanej stali pokazano na rysunku 3.

Mając na uwadze pasmowość, przeprowadzono badania wytrzymałościowe w kierunku wzdłużnym i poprzecznym do walcowania, pomimo tego, że nie jest to wymagane normą, ze względu na fakt, że stal powinna być normalizowana. Wyniki badań wytrzymałościowych jednoznacznie wskazują, że badana stal P265 oprócz tego, że wykazuje różne właściwości w zależności od kierunku badania to dodatkowo wymagania wytrzymałościowe spełnia jedynie w kierunku wzdłużnym i to również po pominięciu przedziałów ufności. Uwzględniając przedziały ufności wytrzymałość na rozciąganie R_m nie jest spełniona. Właściwości wytrzymałościowe badanej stali przedstawiono w tabeli 3.

Największym jednak niebezpieczeństwem rzutującym na prawidłową pracę urządzenia jest podobnie, jak we wcześniej opisywanej stali S235, sprowadzenie do jednego punktu granicy plastyczności $R_{p0,2}$ i wytrzymałości na rozciąganie R_m .

W urządzeniach ciśnieniowych pracujących w różnych stanach obciążenia mechanicznego oraz cieplnego niezachowanie wymogu $R_e = 0,65 R_m$ musi skutkować zniszczeniem zmęczeniowym maszyny [2]. Ze względu na to, że urządzenia takie

są najczęściej spawane, to spoiny są różnie ukierunkowane do kierunku walcowania jeżeli stal nie jest normalizowana. Podczas obciążeń cieplnych, które są nieliniowe, muszą nastąpić pęknięcia połączeń spawanych podczas eksploatacji.

Wyniki badań metalograficznych i wytrzymałościowych raczej wskazują na to, że zastosowano stal nie do pracy w temperaturze podwyższonej, a zwykłą stal konstrukcyjną gatunków „S”. Oczywiście na podstawie składu chemicznego nie można tych stali odróżnić ponieważ norma podaje jedynie górne zawartości pierwiastków. Skład chemiczny badanej stali zestawiono w tabeli 4.

Tab. 3. Skład chemiczny badanej stali P265GH

Tab. 3. Chemical composition of the examined S265GH steel

Lp	Pierwiastek [% wag.]	Badana stal P265	Stal P265GH wg PN-EN 10028-2 Max
1	C	0,13	0,2
2	Si	0,25	0,4
3	Mn	1,05	0,8 - 1,4
4	P	0,015	0,03
5	S	0,01	0,025
6	Cr*	0,02	0,3
7	V	0,005	0,02
8	Cu*	0,03	0,3
9	Cr	0,02	0,3
10	Al	0,01	≥0,02
11	Mo*	0,005	0,08
12	Ni*	0,01	0,3
13	Nb	0,01	0,02
15	Fe	reszta	reszta

$$* Cr + Cu + Mo + Ni = 0,02+0,03+0,005+0,01 = 0,065 \leq 0,7\%$$

Tab. 4. Właściwości wytrzymałościowe badanej stali P265GH

Tab. 4. Mechanical properties of the examined 265GH steel

Parametr	Kierunek wzdłużny	Kierunek poprzeczny
$R_{p0,2}$ (MPa)	404 ± 21	369 ± 19
R_m (MPa)	421 ± 17	401 ± 23
A_{50} (%)	$26 \pm 2,3$	$19,73 \pm 2,7$
Wartości minimalne wymagane normą EN-PN 10028-2		
$R_{p0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A_{50} (%)
min. 265	410-530	min. 23

Stal Weldox 700

Stal Weldox 700 jest stalą z grupy AHSS (Advanced Hight Strength Steel). Stale te należą do drobnoziarnistych stali spawalnych, a proces ich wytwarzania może obejmować walcowanie cieplno-plastyczne, walcowanie normalizujące, umacnianie wydzieleniowe i ulepszanie cieplne. Dlatego w stalach tej generacji w jednym gatunku stali mogą występować różne mikrostruktury począwszy od drobnoziarnistego ferrytu z dyspersyjnymi wydzieleniami węglików, azotków i borków aż do osnowy martenzytycznej. Ze względu na fakt, że równoważnik węgla ekwiwalentnego jest mniejszy niż $C_E < 0,45\%$,



Rys. 3. Mikrostruktura ferrytyczno-perlityczna z wyraźną pasmowością w badanej stali P265GH. Trawiono MilFe

Fig. 3. Ferritic-pearlitic banding microstructure of the examined P265GH steel. Etched with MilFe

stale te uważane są za spawalne bez potrzeby stosowania specjalnych technik. Przedmiotowe normy również dla tych stali określają tylko maksymalne zawartości pierwiastków stopowych, które są dobierane indywidualnie przez producenta. Dodatkowo brak jasno określonych parametrów zabiegów technologicznych sprawia, że struktura tych stali uzależniona jest od grubości gotowego produktu. Wszystkie te czynniki wpływają na właściwości wytrzymałościowe, technologiczne i eksploatacyjne.

Badania stali Weldox 700 prowadzono na dwóch blachach o grubości 8 i 12 mm. Według normy PN-EN 10025-6 stal tę można zaliczyć do stali gatunku S690Q. Skład chemiczny stali Weldox 700 i S690Q zestawiono w tabeli 5. Jak wynika z analizy składu chemicznego skład chemiczny blach jest mocno rozbieżny. Producent tak dobrał skład i sposób umocnienia aby spełnić kryteria wytrzymałościowe oraz równoważnik węgla C_E . Jednak jak spojrzymy na zawartości pierwiastków, to można zauważyć prawidłowość, że zwiększając zawartość węgla natychmiast kilkukrotnie a nawet kilkadziesiąt razy zwiększa się ilość niektórych pierwiastków podnoszących hartowność takich jak np. Cr, Mo. Wynika to z potrzeby umocnienia materiału o większej grubości w wyniku obróbki cieplnej. Stale o mniejszej grubości umocnione są poprzez rozdrobnienie ziarna, roztworowo - przez większą zawartość manganu oraz zgniotem. Przekłada się to bezpośrednio na mikrostrukturę, która w stali o grubości 8 mm była strukturą ferrytyczną, niestety z zróżnicowanej wielkości ziaren oraz z wyraźną segregacją węglików. Natomiast w stali o grubości 12 mm zaobserwowano mikrostrukturę niskowęglowego martenzytu. Mikrostrukturę blachy o grubości 8 mm pokazano na rysunku 4 a blachy grubości 12 mm na rysunku 5.

Rozbieżności w składzie chemicznym są głównym problemem podczas spawania tych stali i doboru właściwych parametrów procesu. Twierdzenie, że stale te są spawalne, ponieważ posiadają C_E mniejsze od 0,45% jest błędne, co wykazywano w pracach [8-11]. Autorzy stwierdzili silne utwardzenie materiału w wyniku zahartowania SWC wynoszące prawie 500 HV. Jak również obliczane temperatury podgrzania wstępnego stali do spawania wynosiły w zależności od metody od 39°C do 703°C. Łącząc blachy o różnych grubościach z różną nawet o kilkadziesiąt procent zawartością węgla i pierwiastków zwiększających hartowność, nie da się uniknąć efektu muli-

tiplikowania oddziaływania tych pierwiastków i utwardzenia złącza spawanego. Będzie to w konsekwencji powodowało mikropęknięcia hartownicze i złomy zmęczeniowe.

Analizując badaną stal pod względem przydatności w konstrukcjach mechanicznych również należy zwrócić szczególną uwagę na bardzo blisko położone, a nawet pokrywającą się granicę plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie. W badaniach wytrzymałościowych blachy o grubości 8 mm uzyskano R_e równe 760 ± 24 MPa, a R_m wynosiło 781 ± 23 MPa. Uwzględniając przedziały ufności powyższe wielkości są sobie równe a więc stosunek R_e/R_m wynosi 1.

Konstrukcja wykonana z takiego tworzywa jest bardzo niebezpieczna i podczas obciążeń zmiennych będzie narażona na pękanie zmęczeniowe, które również zaistniało w analizowanym przypadku [10]. Od wielu lat jest wiadomo, że w elementach narażonych na zmęczenie nie powinno się stosować stali o wysokiej granicy plastyczności i niekorzystnym, większym od 0,65 stosunku R_e/R_m [2]. Własności wytrzymałościowe badanej stali zestawiono w tabeli 6.

Tab. 5. Skład chemiczny badanej stali Weldox 700
Tab. 5. Chemical composition of the examined Weldox 700 steel

Lp	Pierwiastek [% wag.]	Blacha grubości 8mm	Blacha grubości 12mm	Zawartość wg producenta (max) [7]	Stal S690Q wg PN-EN10025-6 (max)
1	C	0,05	0,15	0,20	0,2
2	Si*	0,18	0,34	0,60	0,8
3	Mn*	1,61	0,90	1,60	1,7
4	P	0,008	0,007	0,020	0,025
5	S	0,001	0,003	0,010	0,025
6	B*	0,000	0,002	0,005	0,005
7	Nb*	0,05	0,003	0,04	0,06
8	Cr*	0,03	0,66	0,70	1,5
9	V*	0,01	0,05	0,09	0,12
10	Cu*	0,03	0,15	0,30	0,5
11	Ti*	0,11	0,02	0,04	0,05
12	Al*	0,03	0,05	(min) 0,015*	--
13	Mo*	0,005	0,23	0,70	0,7
14	Ni*	0,03	0,05	2,0	2,0
15	N	--	--	0,015	0,015
16	Fe	reszta	reszta	reszta	reszta

*) zawartości pierwiastków stopowych z Al, V, Nb, Ti powinna wynosić min 0,040 %

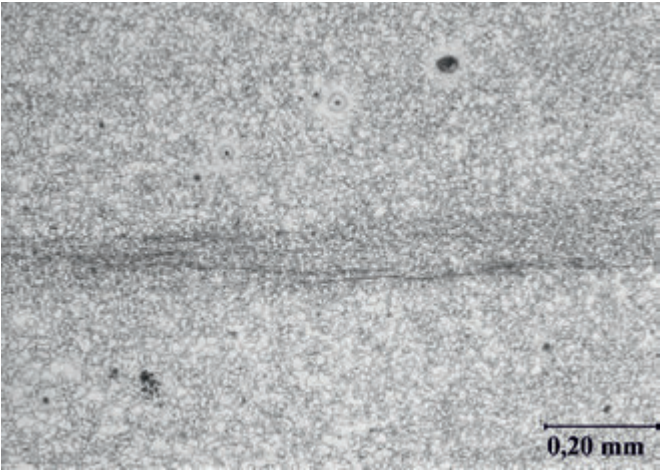
Wnioski

Stale konstrukcyjne produkowane według obecnie obowiązujących norm mogą powodować wiele problemów technologicznych i eksploatacyjnych pomimo spełnienia wymagań zapisanych w normach. Jest to wynikiem nieprecyzyjnych zapisów oraz dużą dowolnością producentów w kształtowaniu mikrostruktury, składu chemicznego i właściwości mechanicznych. Różnice te stwarzają problemy np. podczas spawania i kształtowania tych stali. Największe jednak zagrożenie podczas

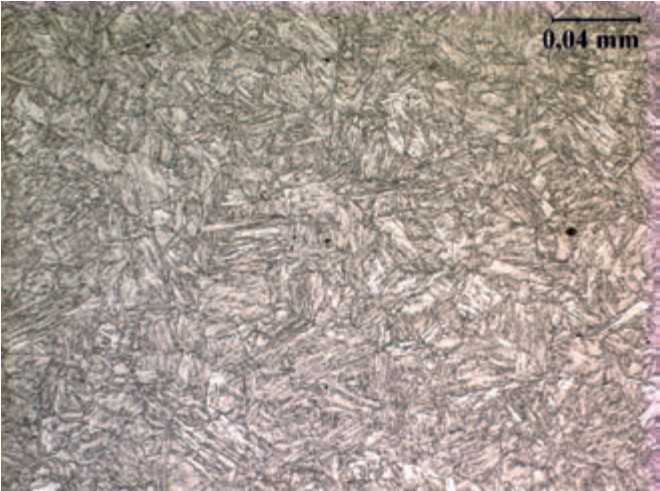
eksploatacji powoduje spowodowanie naprężenia odpowiadającego granicy plastyczności R_e do poziomu wytrzymałości na rozciąganie R_m , tak, że wartość R_e/R_m wynosi 1.

Tab. 6. Właściwości wytrzymałościowe badanej stali Weldox 700
Tab. 6. Mechanical properties of the examined Weldox 700 steel

Parametr	Oznaczenie próbki				Wartość średnia
	1	2	3	4	
$R_{p0,2}$ (MPa)	761	775	767	739	760 ± 24
R_m (MPa)	775	802	781	767	781 ± 23
A_{50} (%)	17,4	16,4	17,8	19,0	$17,65 \pm 1,7$
Wartości minimalne podawane przez producenta stali Weldox 700[7]					
$R_{p0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)		A_{50} (%)		
700	780-930		18		
Wartości minimalne dla stali S690Q					
690	770-940		14		



Rys. 4. Mikrostruktura stali Weldox 700 o grubości blachy 8 mm. Drobnziarnista struktura ferrytyczna z widoczną segregacją węglików w środkowej części blachy. Trawiono Mi1Fe
Fig. 4. Microstructure of the sheet gauge 8 mm made from Weldox 700 steel . Ferritic structure with segregation of carbides in middle part of the sheet. Etched with Mi1Fe

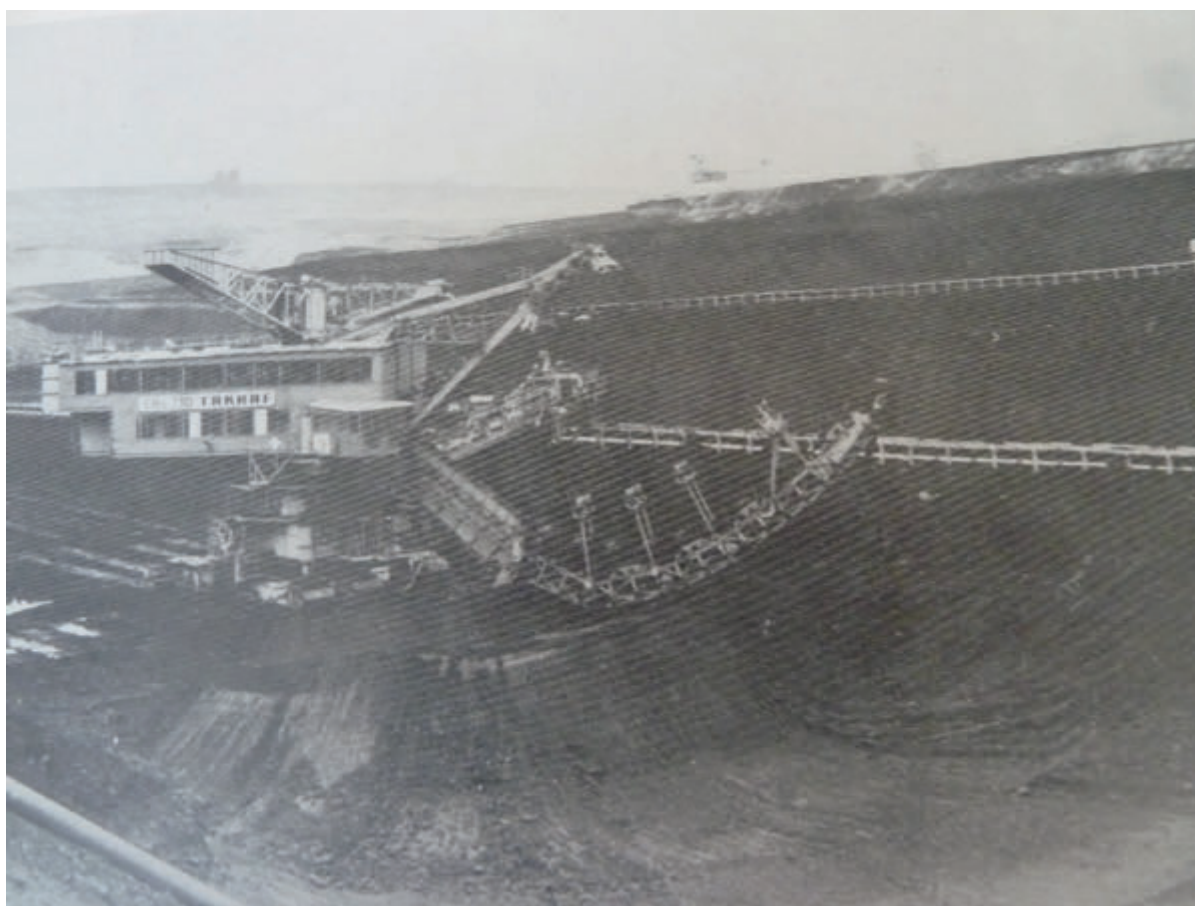


Rys. 5. Mikrostruktura blachy o grubości 12 mm ze stali Weldox 700Struktura niskowęglowego martenzytu. Trawiono Mi1Fe
Fig. 5. Microstructure of the sheet gauge 12 mm made from Weldox 700 steel. Structure of the low-carbon martensite. Etched with Mi1Fe

Literatura

- [1] Haimann R., *Metaloznawstwo*, Oficyna Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000
- [2] Dobosiewicz J., *Badania diagnostyczne urządzeń ciepłno-mechanicznych w energetyce – część 2 - Kotły i rurociągi*, Biuro Gamma, Warszawa 1999
- [3] Norma PN-EN 10025:2007
- [4] Tasak E., *Metalurgia spawania*, JAK, Kraków 2008
- [5] Blicharski M., *Inżynieria materiałowa – stal*, WNT, Warszawa 2010
- [6] Lachowicz M., M., Lachowicz M., B., Nosko W., *Odporność korozyjna połączeń spawanych ze stali Weldox 700*, Przegląd Spawalnictwa nr 2, 2010,
- [7] www.weldox.com
- [8] Żyliński B., Kustroń P., Rutkowska-Gorczyca M., Ambroziak A., Lachowicz M., *Mikrostruktura połączeń wykonanych różnymi metodami spajania nowoczesnej stali DP800 stosowanej w przemyśle motoryzacyjnym*, XXXVI Szkoła Inżynierii Materiałowej, Kraków-Krynica, 23-26.09.2008
- [9] Kustroń P., Rutkowska-Gorczyca M., Ambroziak A., Lachowicz M., *Mikrostruktura połączeń spajanych nowoczesnej stali DP600 stosowanej w przemyśle motoryzacyjnym*, XXXVI Szkoła Inżynierii Materiałowej, Kraków-Krynica, 23-26.09.2008
- [10] Lachowicz M., Nosko W., *Spawanie stali konstrukcyjnej Weldox 700*, Przegląd Spawalnictwa nr 1, 2010
- [11] Węglowski M., S., Zeman M., *Prevention of cold cracking in ultra-high strength steel Weldox 1300*, Archives of Civil and Mechanical, w druku

Z cyklu: Sentymentalne wędrówki po meandrach polskiej myśli techniki górniczej



Koparka łańcuchowa ERs 710

Reprint Renata S-K