

Podstawowe wiadomości o stalach odpornych na korozję

SPIS TREŚCI

| Nazwa rozdziału | Strona |
|--|--------|
| 1. Wstęp | 2 |
| 2. Ogólny podział stali | 2 |
| 3. Istota odporności korozyjnej stali | 6 |
| 4. Rodzaje korozji | 7 |
| 5. Tablice i wykresy odporności korozyjnej | 12 |
| 6. Własności mechaniczne, technologiczne i fizyczne stali odpornych na korozję | 14 |
| 7. Rodzaje wyrobów hutniczych ze stali odpornych na korozję | 18 |
| 8. Zastosowanie stali odpornych na korozję | 24 |
| 9. Stale żaroodporne | 25 |

PODSTAWOWE WIADOMOŚCI O STALACH ODPORNYCH NA KOROZJĘ

1. WSTĘP

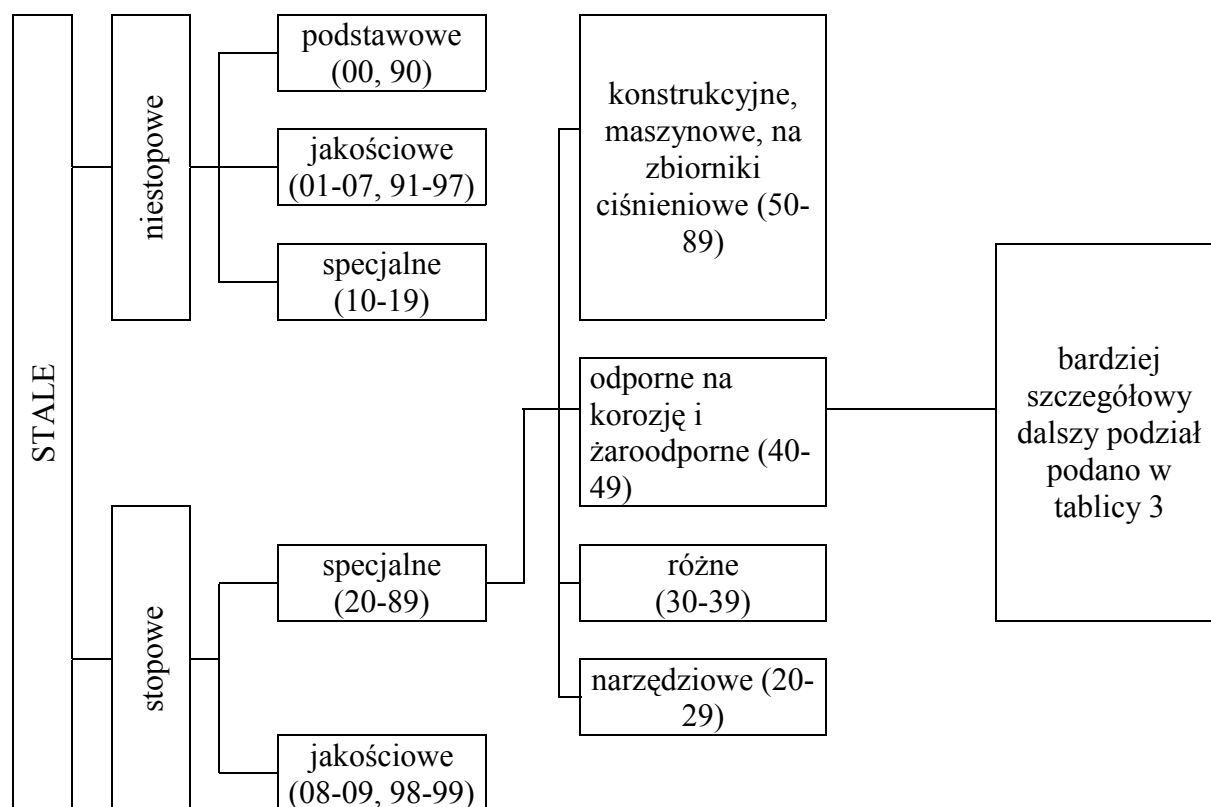
Przy licznych swych zaletach, żelazo i stale (będące stopami żelaza z węglem) mają jedną podstawową wadę- ulegają stopniowemu niszczeniu przez korozję. Około 100 lat temu odkryto, że korozję żelaza można ograniczyć, a w niektórych przypadkach praktycznie nie dopuścić do jej powstania, jeżeli do żelaza doda się niektóre inne pierwiastki chemiczne, przede wszystkim znaczną ilość chromu. Stale o tak zmienionym składzie chemicznym nazwano stalami odpornymi na korozję (w skrócie SONK) lub krócej stalami nierdzewnymi.

Oddając do rąk czytelników to „ABC stali nierdzewnych” autorzy wyrażają nadzieję, że opracowanie ułatwi osobom zainteresowanym stalami odpornymi na korozję pełniejsze zapoznanie się z problematyką tych stali. Przy doborze informacji starano się możliwie szeroko uwzględnić obowiązujące już w Polsce, lecz mało jeszcze znane normy europejskie (PN-EN) dla stali nierdzewnych.

Specjalne podziękowanie wyrażamy firmie „INVESTA” w Gdańsku, która sfinansowała koszty opracowania i wydania tej publikacji.

2. OGÓLNY PODZIAŁ STALI

Stalami nazywamy techniczne stopy żelaza z węglem i z innymi pierwiastkami, zawierające do 2 % węgla (symbol chemiczny „C”) i powyżej 50 % żelaza (Fe). Dotąd opracowano kilkanaście tysięcy gatunków stali. Dzielią się one na klasy, na grupy gatunków i na poszczególne gatunki. Stosowany w normach europejskich ogólny podział stali przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat podziału stali według PN-EN 10027-2

2.1. Stale odporne na korozję

2.1.1. Definicja, nazewnictwo i normy

O przynależności gatunku stali do klasy stali odpornych na korozję decyduje zawartość chromu. Według najnowszej definicji stali odpornych na korozję, podanej w normie europejskiej PN-EN 10088-1, „za stale odporne na korozję uważa się stale, zawierające co najmniej 10,5 % Cr i max.1,2 % C, jeśli ich najważniejszą własnością jest odporność na korozję”.

Zarówno samodzielnie opracowane w Polsce normy dla stali nierdzewnych jak i przetłumaczone na język polski normy europejskie mają w nagłówku taką samą nazwę „NORMY POLSKIE”. Różnica występuje dopiero w symbolach poprzedzających numer normy: PN względnie PN-EN. Aby ułatwić rozpoznanie, o jakie normy chodzi, w niniejszym opracowaniu normy przygotowane w kraju nazwano w tekście normami polskimi, zaś normy przetłumaczone- normami europejskimi.

W Polsce stale odporne na korozję wytopione zostały po raz pierwszy już przed 1927 rokiem. Były to stale chromowe nazwane stalami nierdzewiejącymi. W 1927 roku podjęto produkcję stali austenitycznych, które nazwano stalami kwasoodpornymi chromowo-niklowymi. Podział na stale nierdzewne i kwasoodporne utrzymał się w Polsce do obecnego czasu i jest nadal powszechnie stosowany, zwłaszcza przez użytkowników stali odpornych na korozję.

W obowiązującej w Polsce od 1998 roku normie europejskiej PN-EN 10008-1 „Stale odporne na korozję. Gatunki” (wersja w języku polskim) stale odporne na korozję podzielone zostały na cztery grupy, w zależności od budowy wewnętrznej (struktury) stali:

- stale ferrytyczne,
- stale martenzytyczne i umacniane wydzieleniowo,
- stale austenityczne,
- stale ferrytyczno-austenityczne.

W tablicy 1 podano ważniejsze normy polskie dotyczące gatunków stali odpornych na korozję, zaś w tablicy 2 wyszczególniono opracowane dotąd polskie wersje norm europejskich z tego zakresu.

Tablica 1

Ważniejsze polskie normy określające gatunki stali odpornych na korozję

| Nr normy | Tytuł | Uwagi |
|---------------|---|-------------------------------------|
| PN-71/H-86020 | Stal odporna na korozję (nierdzewna i kwasoodporna). Gatunki | Ostatnie wydanie nr 8, z lipca 1985 |
| PN-71/H-86022 | Stal żaroodporna. Gatunki | Ostatnie wydanie nr 6 - luty 1986 |
| BN-77/0631-11 | Nowe stale odporne na korozję (nierdzewne, kwasoodporne, utwardzalne wydzieleniowo, żaroodporne). Gatunki | Wydanie IV Poprawione |

Tablica 2

Ważniejsze normy europejskie na stale odporne na korozję,
dla których opracowano już polskie wersje językowe

| Nr normy | Tytuł | Uwagi |
|------------------|---|-----------------------------------|
| PN-EN 10088-1 | Stale odporne na korozję. Gatunki | obowiązuje od 23 lipca 1998 |
| PN-EN 10088-2 | Stale odporne na korozję. Warunki techniczne dostawy blach grubych, cienkich oraz taśm ogólnego przeznaczenia | w druku |
| PN-EN 10088-3 | Stale odporne na korozję. Warunki techniczne dostawy półwyrobów, prętów, walcówki i kształtowników ogólnego przeznaczenia | w druku |
| PrPN-EN 10095 | Stale żaroodporne i stopy niklu | projekt w ankietyzacji |

2.1.2. Podział stali odpornych na korozję na grupy gatunków

Podział taki przedstawiony zostanie na przykładzie klasyfikacji zastosowanej w normach europejskich, w których stale odporne na korozję i żaroodporne znajdują się w klasie

nr 4. Podział tej klasy na grupy gatunków podano w tablicy 3.

Tablica 3

Podział stali odpornych na korozję na grupy gatunków,
według normy europejskiej PN-EN 10027-2

| Nr grupy | Rodzaje gatunków w klasie nr 4: stale odporne na korozję i żaroodporne |
|----------|---|
| 40 | stal odporna na korozję o zawartości poniżej 2,5 % Ni, bez Mo, Nb i Ti |
| 41 | stal odporna na korozję o zawartości poniżej 2,5 % Ni, z Mo, lecz bez Nb i Ti |
| 42 | miejsce zapasowe |
| 43 | stal odporna na korozję o zawartości powyżej 2,5 % Ni, lecz bez Mo, Nb i Ti |
| 44 | stal odporna na korozję zawierająca powyżej 2,5 % Ni, z Mo, lecz bez Nb i Ti |
| 45 | stale odporne na korozję ze specjalnymi dodatkami |
| 46 | stopy Ni odporne chemicznie i żaroodporne |
| 47 | stale żaroodporne zawierające poniżej 2,5 % Ni |
| 48 | stale żaroodporne o zawartości powyżej 2,5 % Ni |
| 49 | materiały do pracy w podwyższonych temperaturach |

2.1.3. Zasady oznaczania polskich gatunków stali odpornych na korozję

Polskie oznaczenia gatunków stali odpornych na korozję składają się z cyfr i liter. Cyfry przed pierwszą literą podają zawartość węgla, a po literach zawartość dodatków stopowych. Gdy zawartość dodatku stopowego jest mniejsza od 1 %, to nie podaje się żadnej cyfry. Litery podają rodzaje dodatków stopowych (tablica 4).

Tablica 4

Oznaczenia dodatków stopowych w stalach nierdzewnych
stosowane w polskich normach

| Symbol w PN | H | N | M | T | G | J | Cu | Nb | A |
|-------------------|-------|--------|---------------|-------|-------------|------|-------|------|------|
| pierw. chemiczny | Cr | Ni | Mo | Ti | Mn | Al | Cu | Nb | N |
| nazwa pierwiastka | chrom | nikiel | mo- libden | tytan | man- gan | glin | miedź | niob | azot |

Zawartości węgla określone są następującymi cyframi:

00-max. 0,03 % C,

0- od max. 0,05% do max.0,08 %C, w zależności od gatunku stali,

1, 2, 3 i 4 -odpowiednio około 0,1, 0,2, 0,3 i 0,4 % C.

Przykłady odczytywania składu chemicznego stali z oznaczenia gatunku:

0H13 - stal chromowa zawierająca max. 0,08 % węgla i średnio 13 % chromu,

00H18N10 -stal chromowo-niklowa zawierająca max. 0,03 % węgla, średnio 18 % chromu i 10 % niklu,

H17N13M2T - stal chromowo-niklowo-molibdenowo-tytanowa zawierająca 17 % chromu, 13 % niklu, 2 % molibdenu i poniżej 1 % tytanu.

2.1.4. Zasady oznaczania gatunków stali nierdzewnych w normach PN-EN

Normy europejskie przewidują dwa systemy oznaczania gatunków stali: system cyfrowy i system znaków stali.

W systemie cyfrowym oznaczenie gatunku stali składa się obecnie z 5 cyfr, z których pierwsza oddzielona jest kropką od pozostałych (X. XX XX). Pierwsza cyfra (przed kropką) podaje numer grupy materiału. Dla stali jest to cyfra 1. Drugi człon, składający się z dwu cyfr podaje grupę stali (gatunków). W przypadku stali odpornych na korozję są to grupy wymienione w tabelicy 3. Trzeci człon, również dwucyfrowy, podaje numer kolejny gatunku w grupie.

Przykładowo z oznaczenia 1.4301 można wywnioskować, że jest to stal odporna na korozję (a więc zawierająca powyżej 10,5 % chromu), posiadająca powyżej 2,5 % niklu (klasa 43), bez dodatków molibdenu, niobu i tytanu. Gatunek 1.4301 został zapisany jako pierwszy (01) w grupie gatunkowej „43” stali odpornych na korozję. Polskim odpowiednikiem stali 1.4301 jest gatunek 0H18N9.

W systemie znaków, w przypadku gatunków stali odpornych na korozję symbole stali wskazują na jej ilościowy skład chemiczny. System znaków składa się z następujących liter i liczb:

- a) z litery X podającej, że co najmniej jeden pierwiastek stopowy występuje w ilości większej od 5 %,
- b) z liczb umieszczonych za literą X, odpowiadających 100-krotnej wymaganej średniej zawartości węgla,
- c) z symboli pierwiastków chemicznych wskazujących, jakie dodatki stopowe zawiera stal, przy czym symbole zapisuje się w kolejności malejących zawartości pierwiastków,
- d) z liczb za symbolami pierwiastków podających zawartość pierwiastków stopowych.

Poniżej przedstawiono kilka przykładów odczytywania składu chemicznego gatunków stali na podstawie ich znaków:

Znak gatunku X30Cr13 podaje, że stal zawiera co najmniej jeden składnik stopowy w ilości powyżej 5 %. Stal posiada średnio 0,3 % węgla i 13 % chromu. Z zawartości chromu powyżej 10,5 % wynika, że jest to stal odporna na korozję .

Znak X17CrNi16-2 wskazuje, że jest to stal odporna na korozję (polski skrót tych stali to SONK) o średniej zawartości 0,17 %węgla, 16 %chromu i 2% niklu.

Znak X6CrNiMoTi17-12-2 oznacza SONK o średniej zawartości węgla 0,06 %, posiadającą 17 % chromu, 12 % niklu, , 2 % molibdenu i poniżej 1 % tytanu.

3. ISTOTA ODPORNOŚCI KOROZYJNEJ STALI

Pod pojęciem korozji rozumie się niszczenie metali pod wpływem chemicznej lub elektrochemicznej reakcji z otaczającym środowiskiem. Natomiast niszczenie metali pod wpływem zjawisk fizycznych określa się jako erozję lub zużycie ściernie bądź cierne. W niektórych przypadkach występują równocześnie zjawiska fizyczne i oddziaływanie chemiczne i wówczas używa się pojęć: korozja-erozja, zużycie korozyjne lub korozja cierna.

Proces korozji jest wynikiem dążenia metali do przejścia w naturalny dla nich stan utleniony. Szybkość niszczenia korozyjnego zależy zarówno od stopnia agresywności środowiska jak i od rodzaju metalu lub stopu.

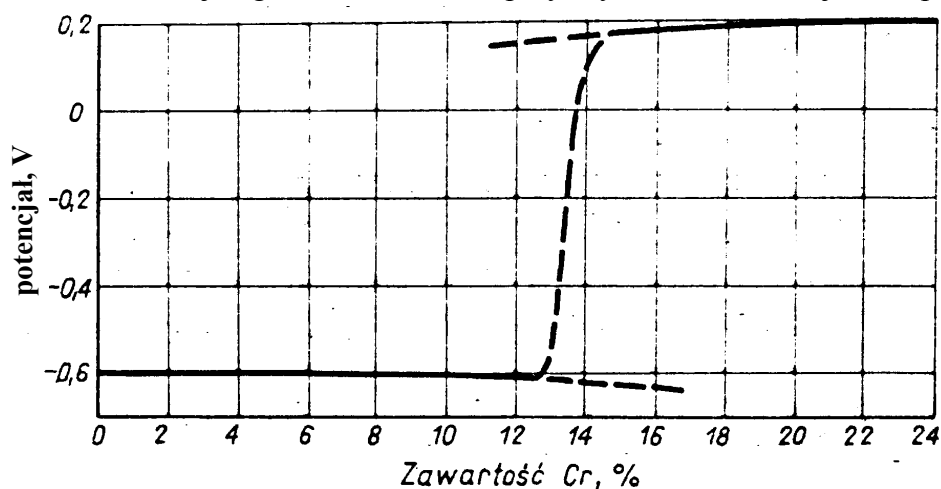
Metale szlachetne, w tym złoto i platyna mają bardzo dużą odporność na korozję i to nawet w bardzo silnych środowiskach korozyjnie agresywnych, np. w kwasach. Inna grupa metali, do których należy chrom i glin, charakteryzuje się podwyższoną odpornością korozyjną w niektórych środowiskach o umiarkowanej agresywności. Natomiast żelazo (wykorzystywane najczęściej w postaci stali), charakteryzuje się niewielką tylko odpornością na działanie korozji, nawet w powietrzu.

Różne zachowanie korozyjne metali i stopów związane jest z tworzeniem się na powierzchni wyrobów metalowych bardzo cienkiej, niewidocznej warstewki, która chroni metal przed korozją. Zjawisko to zostało nazwane pasywacją powierzchni metalu, a stan w jakim znajduje się ten metal – stanem pasywnym. Szczególnie dużą skłonność do pasywacji wykazują chrom i nikiel, co uzasadnia stosowanie tych metali jako głównych dodatków stopowych do stali nierdzewnych. Już przy zawartości 12-18 % chromu stal wykazuje zdolność do pasywacji prawie taką samą jak czysty chrom. Dodanie do stali niklu, zwłaszcza przy równoczesnej obecności molibdenu, krzemu i miedzi sprawia, że stale nierdzewne zawierające te pierwiastki mają bardzo dobrą odporność na korozję również w środowiskach nieutleniających. Spośród hipotez dotyczących własności warstewek ochronnych jedna z nich zakłada, że jest to molekularna warstewka tlenu związana z powierzchnią metalu w sposób określany jako chemisorpcja, druga zaś, że jest to bardzo cieniutka, dobrze przywierająca do metalu warstewka tlenków. Warstewka ochronna może jednak ulegać uszkodzeniom na skutek oddziaływań mechanicznych lub chemicznych i dlatego aby chroniła skutecznie metal, musi mieć zdolność do odnawiania się (regeneracji) w danym środowisku.

Stale odporne na działanie korozji tym różnią się od zwykłych stali węglowych, że do ich spasywowania w zasadzie nie potrzeba żadnych specjalnych zabiegów, jakie są np. wymagane do pasywacji stali węglowej (konieczność użycia stężonego HNO_3). Pasywacja, czyli przejście metalu w stan pasywny, zaznacza się zmianą potencjału elektrochemicznego na bardziej dodatni (rys. 2).

Jak to widać na rysunku 2, zmiana ta nie zachodzi stopniowo ze wzrostem zawartości chromu, lecz skokowo przy około 13 % Cr. Stopy zawierające ponad 13 % Cr zachowują się jak metale szlachetne, tzn. mają dodatni potencjał i nie korodują w powietrzu, wodzie, niektórych kwasach, solach i zasadach. Wprowadzenie do stali około 13 % Cr czyni ją nierdzewną głównie w ośrodkach utleniających, słabo natomiast w redukujących.

Grubość pasywnej warstewki tlenków, tworzącej się na stalach nierdzewnych najczęściej waha się w przedziale 10-100 Å. Warstewka pasywna na stopach chromowych, składająca się głównie z tlenków żelaza zawiera też metaliczny chrom. W stali austenitycznej typu 18 % Cr – 8 % Ni największą odporność na korozję zaobserwowano przy grubości warstewki tlenkowej w granicach 30-50 Å, przy czym warstewka ta jest bezpostaciowa.



Rys.2 Zależność potencjału stali chromowej od zawartości chromu (F. Staub i inni, Metaloznawstwo, wyd. Śląsk, 1979)

4. RODZAJE KOROZJI

W porównaniu ze stalami węglowymi i niskostopowymi, stale nierdzewne wykazują nieporównywalnie większą odporność na działanie korozji. Dla niektórych wyrobów finalnych z tych stali przyjmowana jest trwałość korozyjna dochodząca nawet do 50 lat eksploatacji. Występują jednak przypadki korodowania stali nierdzewnych. Ma to miejsce np. przy nieodpowiednim doborze gatunku stali w porównaniu z bardzo agresywnym środowiskiem korozyjnym lub przy nieodpowiednim spawaniu stali nierdzewnych. Odporność na korozję tych stali zależy bowiem poza wieloma innymi czynnikami (temperatura, ciśnienie, obecność naprężeń rozciągających) przede wszystkim od agresywności środowiska korozyjnego, z którymi stale mają styczność. Istnieją środowiska, jak np. kwas solny (zwłaszcza o większych stężeniach), w których stale odporne na korozję zachowują się niewiele tylko lepiej niż stal węglowa zwykłej jakości.

Objawy korozji stali nierdzewnych są bardzo różne. Do podstawowych typów korozji, które atakują stale nierdzewne w elektrolitach należą:

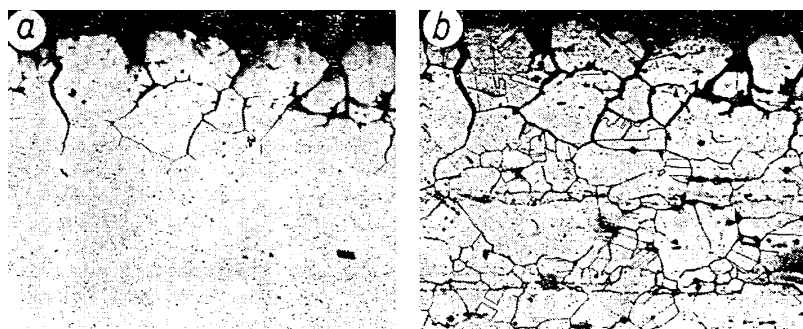
4.1. Korozja równomierna (ogólna)

Jest to korozja stosunkowo najmniej groźna, gdyż polega na równomiernym zaatakowaniu całej powierzchni stali nierdzewnej. W wyniku tego grubość wyrobu stalowego zmniejsza się równomiernie, z jednoczesnym zmniejszeniem się ogólnej wytrzymałości korodowanego elementu. Szybkość ubytku grubości nie powinna jednak przekraczać pewnej praktycznie ustalonej granicy. Dla stali odpornych na korozję jako dopuszczalny przyjmuje się – dla większości zastosowań – średni roczny ubytek grubości nie przekraczający 0,1 mm (wyznacza się wg PN-78/H-04610). Jeżeli zatem w danym środowisku korozyjnie agresywnym ubytek grubości przedmiotu wykonanego ze stali odpornej na korozję jest mniejszy niż 0,1 mm/rok to przyjmuje się, że dla danego zastosowania stal ta wykazuje bardzo dobrą odporność.

Zapobieganie skutkom korozji równomiernej (przez ograniczenie jej szybkości) polega na: wymianie stali na stal o lepszej odporności na korozję, zmianie środowiska korozyjnego (zmiana stężenia, temperatury, prędkości przepływu cieczy, dodanie inhibitora itd.), okresowym pasywowaniu powierzchni stali, zastosowaniu ochrony, np. katodowej.

4.2. Korozja międzykrystaliczna

Korozja międzykrystaliczna należy do najbardziej groźnych typów korozji. Atakuje stale nierdzewne wzdłuż granic ziaren (rys. 3). Agresywne środowisko korozyjne bądź „wyłuskuje” poszczególne ziarna z powierzchni stali, zmniejszając tym samym grubość ścianek urządzenia produkcyjnego, bądź też bez dostrzegalnych oznak zewnętrznych narusza spójność pomiędzy poszczególnymi ziarnami w takim stopniu, że stal już po lekkim uderzeniu rozsypuje się na proszek.



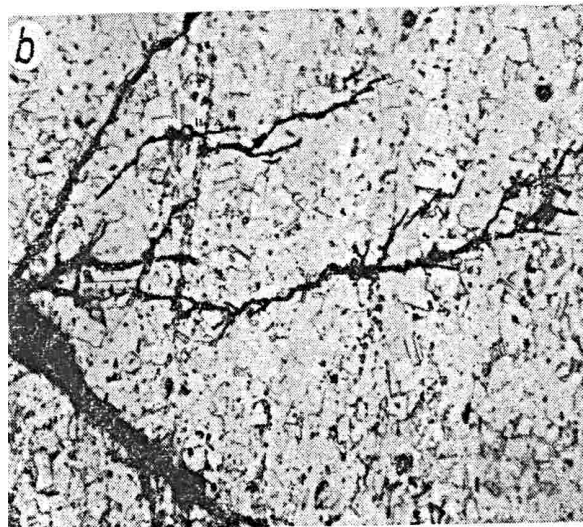
Rys. 3. Korozja międzykrystaliczna austenitycznych stali odpornych na korozję (K. Folek i inni, Charakterystyki Stali, seria E, Tom I, wyd. Śląsk, 1980)

a) zgląd nietrawiony, b) zgląd wytrawiony

Stale nierdzewne korodują międzykrystalicznie wówczas, gdy równocześnie: są skłonne do tego typu korozji, zostały nagrzane do temperatur niebezpiecznych, wynoszących dla stali austenitycznych od 450 do 850⁰C, stykają się ze środowiskiem wywołującym ten typ korozji, np. z HNO₃, mieszaniną H₂SO₄ i CuSO₄ itd.

4.3. Korozja naprężeniowa

Do niebezpiecznej w skutkach korozji, atakującej międzykrystalicznie lub śródkrystalicznie stale odporne na korozję, należy korozja naprężeniowa (rys. 4), która



Rys. 4 Pęknięcia w stali austenitycznej wywołane korozją naprężeniową
a) obraz makroskopowy
b) obraz mikroskopowy
(F. Staub i inni, Metaloznawstwo, wyd. Śląsk, 1979)

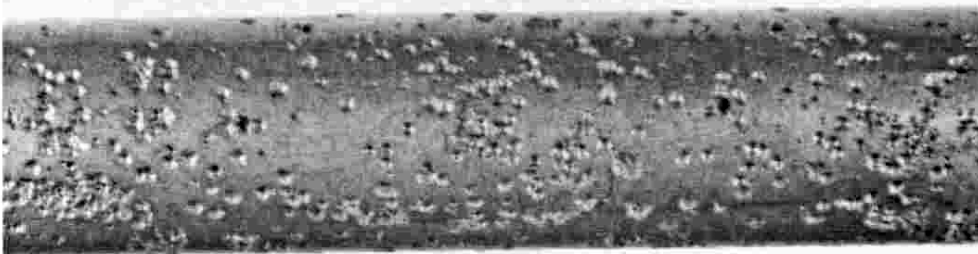
pojawia się tylko wówczas, gdy stal jest podatna na ten typ korozji, stal jest poddana naprężeniom wewnętrznym (własnym) lub przykładanym z zewnątrz, stal jest narażona na działanie środowisk korozyjnie agresywnych wywołujących ten typ korozji, np. chlorków czy ługów, stal pracuje w środowiskach nagranych do temperatury $>60^{\circ}\text{C}$ (poniżej tej temperatury skłonność nieuczulonych stali austenitycznych do pęknięcia naprężeniowego jest zdecydowanie mniejsza).

Dokładne przyczyny skłonności do korozji naprężeniowej stali odpornej na korozję nie zostały jeszcze do końca poznane.

W praktyce zwalczanie korozji naprężeniowej stali austenitycznych polega na: odpowiednim doborze stali ferrytycznych lub ferrytyczno-austenitycznych, oczywiście pod warunkiem, że ich odporność na działanie innych rodzajów korozji w danym środowisku będzie wystarczająca, zmniejszeniu stężenia czynnika agresywnego (np. jonów Cl^-) do zawartości mniejszych od krytycznych, obniżeniu temperatury, zmniejszeniu naprężeń rozciągających do wartości mniejszych od krytycznych; naprężenia własne metalu można wyeliminować poprzez wykonanie obróbki odprężającej.

4.4. Korozja wżerowa

Innym rodzajem korozji miejscowej jest korozja wżerowa (rys. 5), która charakteryzuje się punktowym ubytkiem masy stali. Przebieg procesu korozji wżerowej związany jest z działaniem lokalnego ogniwa, które tworzy się pomiędzy dużą spasywowaną powierzchnią stali stanowiącą katodę, a miejscową zdepasywowaną strefą stanowiącą anodę. Szybkość rozpuszczania się metalu na anodzie jest bardzo duża, w konsekwencji czego następuje w bardzo krótkim czasie przebicie (perforacja) ścianek urządzenia, bez większego ubytku masy poza zaatakowanym miejscem.



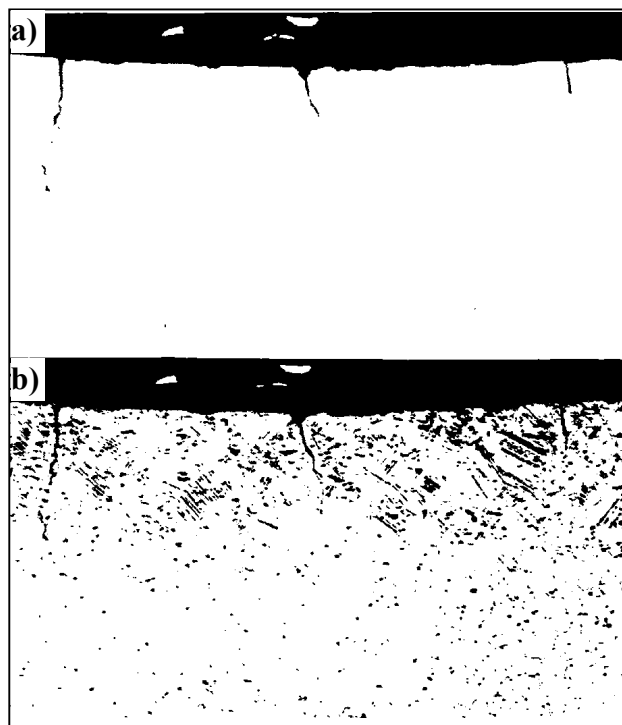
Rys. 5 Korozja wżerowa austenitycznych stali odpornych na korozję (Sandvik Steel, Corrosion Handbook, 1999)

Korozja wżerowa stali odpornych na korozję występuje najczęściej w środowiskach wodnych zawierających jony halogenkowe, tj. jony chloru, bromu, jodu, przy czym jej intensywność zależy głównie od stężenia tych jonów i temperatury. Pojawia się ona przeważnie na wszelkiego rodzaju niejednorodnościach wewnętrznych metalu (wtrącenia niemetaliczne, wydzielania, odkształcenia) i zewnętrznych (krawędzie, zarysowania, wgniecenia, resztki zgorzeliny, osady itd.). Natomiast powierzchnie gładkie i jednorodne są zdecydowanie bardziej odporne na ten typ korozji.

Do szybkiej, aczkolwiek przybliżonej tylko, oceny odporności stali nierdzewnych na korozję wżerową służy współczynnik $PRE = \% Cr + 3,3 \% Mo + k \% N$; $k = 10$ do 30 . Im większa jest wartość współczynnika PRE tym stal ma większą odporność na korozję wżerową.

4.5. Korozja zmęczeniowa

Zjawisko korozji zmęczeniowej jest zjawiskiem występującym na skutek współdziałania środowiska korozyjnie agresywnego i cyklicznych lub zmiennych naprężeń, co w



Rys. 6. Pęknięcia w austenitycznej stali wywołane działaniem korozji zmęczeniowej (S. Czyżowicz, P. Miliński, Prace badawcze IMŻ)

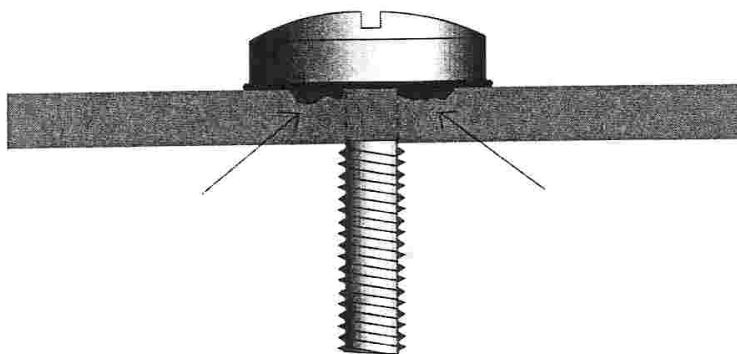
konsekwencji prowadzi do pęknięcia metalu (rys.6). Oddziaływanie naprężeń sprawia, że zostaje naruszona warstewka ochronna (warstewka pasywna) na stali odpornej na korozję, skutkiem czego atakowany jest obszar metalu niechronionego (odsłoniętego). W przeciwieństwie do zjawiska korozji naprężeniowej stali austenitycznych, którą wywołują halogenki (a zwłaszcza chlorki) i ługi, korozja zmęczeniowa może się praktycznie pojawić w dowolnym środowisku wodnym, takim jak: para wodna, gorąca woda, wody naturalne (słone, słodkie), wody kondensacyjne, roztwory chemiczne, wilgotne powietrze.

Badania zjawiska korozji zmęczeniowej stali austenitycznych i stopów, przeprowadzone w wodzie morskiej wskazują, że zasadniczy wpływ na odporność na ten typ korozji wywierają: wytrzymałość materiału na rozciąganie, składniki stopowe polepszające pasywność stali oraz wielkość ziarna.

A zatem zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie, zwiększenie zawartości Cr, Mo i N, a także zmniejszenie wielkości ziarna sprzyjają zwiększeniu odporności stali na korozję zmęczeniową.

4.6. Korozja szczelinowa

Ten typ korozji pojawia się w szczelinach i zagłębieniach konstrukcyjnych, pod uszczelnieniami (rys. 7), główkami śrub i nitów, pod osadami i zgorzeliną oraz we wszelkiego rodzaju pęknięciach.



Rys. 7. Schemat korozji szczelinowej pod podkładką (Sandvik Steel, Corrosion Handbook, 1999)

Korozja szczelinowa powstaje w wyniku stopniowego zanikania warstewki pasywnej w szczelinach, w których na skutek utrudnionego napowietrzenia i zahamowanego dopływu tlenu, warstewka ta nie może się zregenerować. Zapobieganie korozji szczelinowej polega głównie na eliminowaniu szczelin, zwłaszcza konstrukcyjnych, już na etapie projektowania aparatów i urządzeń produkcyjnych.

4.7. Korozja stykowa (galwaniczna)

Korozja ta jest wywołana stykiem dwóch metali lub stopów o różnych potencjałach, w konsekwencji czego powstaje ogniwo galwaniczne. Skuteczność działania ogniwa zwiększa się ze wzrostem różnicy potencjałów stykających się ze sobą dwóch metali w środowisku korozyjnym, np. zawierającym jony chlorkowe. Połączenie stali z metalem o innym elektrochemicznym potencjale, przy udziale elektrolitu sprawia, że metal mniej szlachetny ulega intensywnemu rozpuszczaniu, zwłaszcza gdy:

jego powierzchnia jest znacznie mniejsza w porównaniu z powierzchnią metalu bardziej szlachetnego,

temperatura elektrolitu jest wysoka.

5. TABLICE I WYKRESY ODPORNOŚCI KOROZYJNEJ

Odporność na korozję stali nierdzewnych w określonych środowiskach podawana jest przeważnie w postaci tablic i wykresów. Za miarę odporności korozyjnej przyjmuje się zwykle ubytek masy metalu na jednostkę powierzchni i czasu trwania pomiaru, np. w $g/m^2 \cdot h$ lub $g/m^2 \cdot d$. Między obu jednostkami występuje przy stalach nierdzewnych następująca zależność:

$$1 g/m^2 \cdot h = 1,1 mm/rok.$$

Ogólnie przyjęto, że całkowita odporności stali na działanie wyłącznie korozji równomiernej występuje wtedy, gdy wskaźnik odporności korozyjnej nie przekracza 0,1 mm/rok. Istnieją jednak przypadki, w których przekroczenie tej granicy jest dopuszczalne, zwłaszcza wówczas, gdy produkowane substancje mogą być zanieczyszczone produktami korozji. I odwrotnie – granicę tę należy znacznie obniżyć, jeżeli nawet bardzo nieznaczne ilości zanieczyszczeń wpływają niekorzystnie na jakość produkowanych substancji, np. w przemyśle farmaceutycznym.

Zależności między stopniami odporności na korozję, które są wartościami umownymi a szybkością korozji (w mm/rok) podano w tablicy 5.

Tablica 5

Zależności między stopniami odporności korozyjnej, a szybkością korozji
(Prace badawcze IMŻ)

| Oznaczenie stopnia odporności na korozję | Szybkość korozji mm/rok | Odporność stali |
|--|-------------------------|---|
| 0 | <0,1 | Stal całkowicie odporna |
| 1 | 0,1 ÷ 1,0 | Stal mało odporna (stosować można tylko w szczególnych przypadkach) |
| 2 | >1,0 | Stal nieodporna (stosować nie wolno) |

Stopnie odporności na korozję mogą być uzupełnione dodatkowymi oznaczeniami literowymi oznaczającymi:

p – zagrożenie korozją wżerową (przyjęte zarówno w literaturze polskiej jak i anglosaskiej),

n – zagrożenie korozją naprężeniową (w literaturze anglosaskiej – s),

s – zagrożenie korozją szczelinową (w literaturze anglosaskiej – c),

t.w. – temperatura wrzenia (w literaturze anglosaskiej – BP).

Przykład tablicy odporności korozyjnej przedstawiono w tablicy 6, która podaje stopnie odporności na korozję (równoznaczne z szybkością korozji) w środowisku wodorotlenku potasowego kilku wybranych grup i gatunków stali odpornych na korozję, w porównaniu z odpornością stali węglowej.

Tablica 6

Zachowanie się wybranych materiałów metalowych w wodorotlenku potasowym (Sandvik Steel, Corossion Handbook, 1999)

| Stęż. % | 10 | 20 | 25 | 50 | 50 | 70 | Stopiony |
|----------------------------|------|----|------|----|------|-----|----------|
| Temp. °C | t.w. | 20 | t.w. | 20 | t.w. | 120 | 300-365 |
| Stal węglowa | | | | | | | 2 |
| 13% Cr | 0 | 0 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| 18% Cr - 2% Mo | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 |
| 18% Cr – 10% Ni | 0 | 0 | 0 | 0 | 1n | 1n | 2 |
| 17 %Cr – 12% Ni – 2,5 % Mo | 0 | 0 | 0 | 0 | 1n | 1n | 2 |
| 18% Cr – 13% Ni – 3% Mo | 0 | 0 | 0 | 0 | 1n | 1n | 2 |
| 17% Cr – 14% Ni – 4 % Mo | 0 | 0 | 0 | 0 | 1n | 1n | 2 |
| 904L | 0 | 0 | 0 | 0 | 1n | 1n | 2 |
| Sanicro 28 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | |
| 254 SMO | 0 | 0 | 0 | 0 | | | |
| 654 SMO | 0 | 0 | 0 | 0 | | | |
| SAF 2304 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | |
| 2205 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | |
| SAF 2507 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | |
| Ti | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 2 | 2 |

Objaśnienia do tablicy:

904L - stal austenityczna, odpowiednik stali X1NiCrMoCu 25-20-5 (1.4539) według PN-EN 10088 – 1

Sanicro 28 - stal austenityczna, odpowiednik stali X1NiCrMoCu 31-27-4(1.4563) wg PN-EN

254 SMO -stal austenityczna, odpowiednik stali X1CrNiMoCuN 20-18-7(1.4547) wg PN-EN

654 SMO - stal austenityczna typu 24% Cr-22% Ni-7,3% Mo-0,50% N-0,5% Cu

SAF 2304 - stal ferrytyczno-austenityczna, odpowiednik stali X2CrNiN 23-4 (1.4362) wg PN-EN

2205 - stal ferrytyczno-austenityczna, odpowiednik stali X2CrNiMoN 22-5-3 (1.4462) wg PN-EN

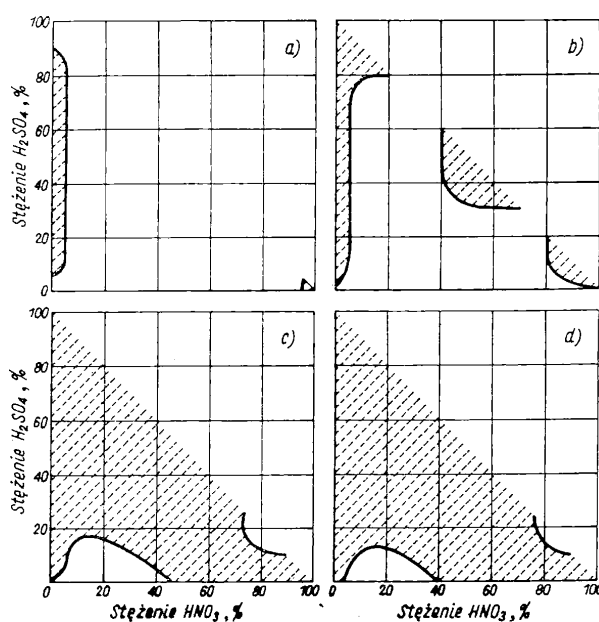
SAF 2507 - stal ferrytyczno-austenityczna, odpowiednik stali X2CrNiMoN 25-7-4 (1.4410) wg PN-EN

Wykresy odporności korozyjnej podawane są w różnych układach współrzędnych, na przykład jako:

izokorozyjne, na których każdy punkt krzywej odpowiada ubytkowi grubości 0,1 mm/rok lub 0,3 mm/rok,

zależności szybkości korozji w mm/rok od stężenia środowiska lub jego zanieczyszczeń, obszarów odporności w układach trójskładnikowych, np. HNO₃-H₂SO₄-H₂O.

Przykładowy wykres pokazany na rys. 8 dotyczy zakresów odporności stali austenitycznej typu 18% Cr- 8% Ni w wodnych roztworach mieszaniny kwasów azotowego i siarkowego .



Rys.8. Szybkość korozji stali zawierającej 0,05% C, 18% Cr, 9,5% Ni w roztworach mieszaniny kwasów azotowego i siarkowego (K. Folek i inni, Charakterystyki Stali, seria E, tom II, wyd. Śląsk, Katowice 1980)

a – przy $t = 30^{\circ}\text{C}$, b – przy $t = 60^{\circ}\text{C}$, c – przy $t = 100^{\circ}\text{C}$, d – przy temperaturze wrzenia; pola nie zakreskowane – szybkość korozji $v \leq 0,1$ mm/rok; pola zakreskowane – $v > 0,1$ mm/rok

Przy doborze właściwego gatunku stali odpornej na korozję do określonego zastosowania należy mieć na względzie, że tablice odporności na korozję dotyczą środowisk czystych, których agresywność wyznaczono w kontrolowanych warunkach przebiegu procesów korozyjnych (w warunkach laboratoryjnych). W praktyce zawsze liczyć się trzeba z pewnymi odchyleniami, które wywierają mogą znaczący wpływ na zachowanie się wybranej stali w rzeczywistych warunkach eksploatacji. W konsekwencji, wybór materiału na podstawie tablic i wykresów jest wyborem wymagającym jego sprawdzenia, gdy to jest możliwe, w próbach terenowych.

6. WŁASNOŚCI MECHANICZNE, TECHNOLOGICZNE I FIZYCZNE STALI ODPORNÝCH NA KOROZJĘ

6.1. Własności mechaniczne

Poszczególne rodzaje stali odpornych na korozję różnią się znacznie pod względem własności mechanicznych, co przykładowo podano w tablicy 7.

6.1.1. Własności mechaniczne stali austenitycznych

Zwykle stale austenityczne (gatunki podstawowe) po zabiegu przesycania, tj. po obróbce cieplnej gwarantującej maksymalną odporność na działanie korozji, nie mają najlepszych wskaźników mechanicznych. Lepsze wskaźniki wytrzymałości stale te uzyskują po dodaniu pierwiastków stabilizujących (Ti, Nb) lub pierwiastków wpływających na umocnienie roztworu stałego austenitu, np. azotu. Niską granicę plastyczności stali austenitycznych i niezbyt dużą wytrzymałość na rozciąganie rekompensuje dość dobra ich ciągliwość, a zwłaszcza udarność i to zarówno w temperaturze pokojowej jak i w temperaturach obniżonych (ujemnych).

Tablica 7

Ogólne porównanie cech wytrzymałościowych różnych rodzajów stali nierdzewnych

| Rodzaj stali | Umowna granica plastyczności $R_{p0,2}$, MPa | Wytrzymałość na rozciąganie R_m , MPa | Ciągliwość A_5 , % | Udarność |
|--|--|--|-------------------------|----------|
| Stal austenitycz. niestabilizowana, przesycona j.w. stabilizowana | 200-230 (niska) ok. 300 (niska) | 500-800 | min. 35 (duża) | wysoka |
| Stal ferrytyczna wyżarzona | 250-300 | 400-650 | 15-25 | niska |
| Stal ferrytyczno-austenityczna przesycona | patrz rys. 9 | | | |
| Stal martenzyt. ok. 0,2 % C hart.+ odpuszcz. | 500-600 | 700-950 | ok. 12 | |
| Stal umocniona wydzieleniowo | min. 1000 | 1070-1270 | min. 10 | |

6.1.2. Własności mechaniczne stali ferrytycznych

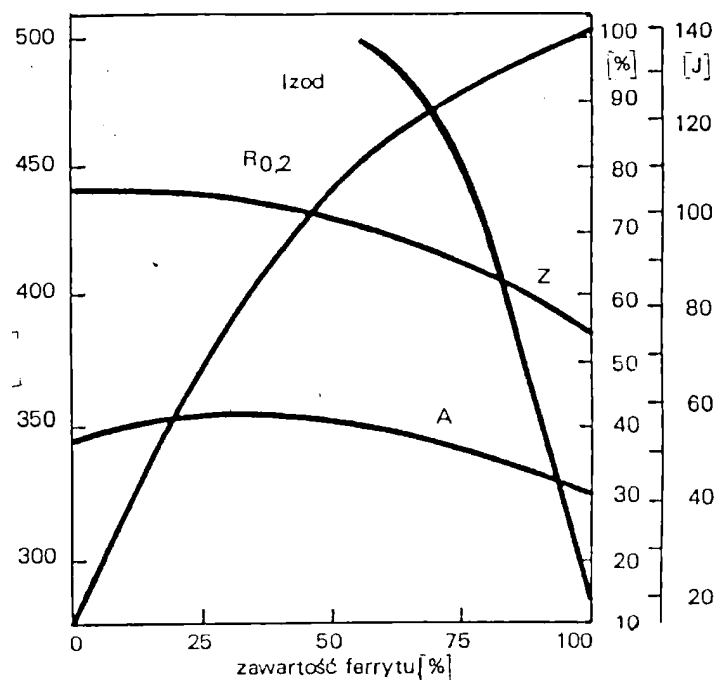
Granica plastyczności ferrytycznych stali chromowych (gatunków standardowych) w stanie wyżarzonym jest nieco lepsza niż $R_{p0,2}$ zwykłych stali austenitycznych, natomiast wytrzymałość na rozciąganie i wydłużenie stali ferrytycznych są wyraźnie gorsze od stali austenitycznych.

Najgorsza jest w porównaniu ze stalami austenitycznymi udarność stali ferrytycznych, która zależy przede wszystkim od wielkości ziaren i od czystości metalurgicznej stali. W stalach o strukturze gruboziarnistej bardzo często zdarza się, że ich udarność w temperaturze otoczenia wynosi zaledwie 10 J/cm^2 . Dlatego też nie wolno stali ferrytycznych – po prawidłowym zakończeniu procesu przeróbki plastycznej – nagrzewać w temperaturach bardzo szybkiego rozrostu ziaren, tzn. w temperaturach wyższych niż 900°C .

6.1.3. Własności mechaniczne stali ferrytyczno-austenitycznych

Stale ferrytyczno-austenityczne są wysokostopowymi stalami odpornymi na korozję, które dzięki odpowiedniemu składowi chemicznemu i obróbce cieplnej mają strukturę złożoną z dwóch podstawowych faz: ferrytu i austenitu. Zawartość austenitu wynosi 40-60 % objętościowych.

Własności stali ferrytyczno-austenitycznych są wypadkową własności ferrytu i austenitu. Ferryt zwiększa wytrzymałość na rozciąganie, granicę plastyczności, twardość i kruchość, natomiast austenit – ciągliwość i udurołość. Własności w zależności od gatunku stali i warunków przesycaenia zmieniają się w dość szerokich granicach (rys.9).



Rys. 9. Wpływ zawartości ferrytu na własności mechaniczne stali ferrytyczno-austenitycznej zawierającej 0,05 % C, 23 % Cr, 3 % Mo i zmienną ilość niklu (M.J.Matthews, The Metallurgist & Material Technologies, 1982, tom 14, nr 5, str. 205-210)

Stale ferrytyczno-austenityczne pod względem wytrzymałości przewyższają – i to znacznie – stale austenityczne, np. ich granica plastyczności jest przynajmniej dwukrotnie większa. Również ich udurołość i plastyczność dorównuje, a niekiedy przewyższa te same własności stali austenitycznych. Temperatura przejścia w stan kruchości stali ferrytyczno-austenitycznych leży na ogół poniżej -50°C , a dolna wartość energii łamania jest rzędu 30 J.

6.1.4. Własności mechaniczne stali martenzytycznych

Stale martenzytyczne są tymi stalami odpornymi na korozję, których własności mechaniczne można dość znacznie polepszyć stosując zabiegi hartowania i odpuszczania. Wybór gatunków stali martenzytycznych jest dość duży, przy czym ich skład chemiczny, a zwłaszcza zawartość węgla, chromu i innych składników stopowych (np. Mo) jest tak zróżnicowany, że można uzyskać stal o optymalnym zespole własności, tj. wytrzymałości, ciągliwości (zwłaszcza przy obciążeniach dynamicznych) i wystarczającej odporności na korozję.

Największą twardość po zahartowaniu uzyskują stale martenzytyczne zawierające oprócz dużej ilości węgla (ok. 1 %), chromu (od ok. 16 do ok. 19 %), molibdenu (od ok. 0,5 do ok. 1,0 %) również wanad. Ich twardość w wyrobach użytkowych sięga 56÷61 HRC.

6.1.5. Własności mechaniczne stali umacnianych wydzieleniowo

Stale umacniane wydzieleniowo (głównie związkami międzymetalicznymi typu Fe_2Mo , Ni_3Ti , Ni_3Al i innymi) należą do tej grupy stali odpornych na korozję, które z jednej strony odznaczają się dobrą lub nawet bardzo dobrą odpornością na korozję (w niektórych przypadkach dorównują stali austenitycznej 1H18N9T), a z drugiej – doskonałymi wskaźnikami mechanicznymi, praktycznie nieosiągalnymi w innych stalach odpornych na korozję. W zależności od struktury końcowej stale te można podzielić na austenityczne, pólaustenityczne i martenzytyczne. Z tych ostatnich stali, najbardziej popularnych w

zastosowaniach praktycznych, wymienić można stal o znaku X5CrNiMoCuNb 14-5 (numer 1.4594), która po obróbce cieplnej (obejmującej zabiegi hartowania i starzenia) osiąga następujące wskaźniki mechaniczne: $R_{p0,2}$ min. 1000 MPa, R_m od 1070 do 1270 MPa, A min. 10 %.

6.2. Własności technologiczne

6.2.1. Spawalność

Wśród stali odpornych na korozję wyróżnić można stale spawalne, stale o ograniczonej spawalności i stale niespawalne. Do stali spawalnych należą praktycznie wszystkie stale austenityczne, ferrytyczno-austenityczne oraz niektóre stale ferrytyczne zawierające bardzo małą ilość węgla. Stale ferrytyczne zawierające większą ilość węgla i niektóre stale martenzytyczne z małą ilością węgla są stalami o ograniczonej spawalności, tzn. wymagają przed spawaniem podgrzewania do temperatury 100 – 300⁰C. Pozostałe stale martenzytyczne są w zasadzie niespawalne.

Do spawania stali odpornych na korozję stosuje się wszystkie znane metody spawania (z wyjątkiem spawania autogenicznego).

6.2.2. Odkształcalność na zimno

Wszystkie przesycone austenityczne i zmiękczone ferrytyczne stale odporne na korozję nadają się do odkształcania na zimno, zwłaszcza zaś do głębokiego tłoczenia. W czasie tego zabiegu oba te rodzaje stali zachowują się jednak inaczej.

6.2.3. Skrawalność

Zdolność do skrawania poszczególnych grup stali odpornych na korozję jest bardzo różna. Najmniej trudności sprawia skrawanie zmięczonych stali martenzytycznych oraz ferrytycznych. Znacznie trudniej skrawa się stale austenityczne, głównie na skutek dużej skłonności do utwardzania przez zgniot. Dobierając odpowiednie parametry skrawania (zwłaszcza szybkość skrawania) oraz narzędzia można skrawać także i stale austenityczne. Dla ułatwienia skrawania stali odpornych na korozję do niektórych z nich dodaje się siarkę, selen i inne składniki polepszające obróbkę wiorową.

6.2.4. Wpływ stanu powierzchni wyrobów na odporność na korozję

Wyroby hutnicze ze stali odpornych na korozję stosuje się zazwyczaj po wytrawieniu, wygładzeniu walcowaniem, szlifowaniu, szcztokowaniu, polerowaniu mechanicznym lub elektrochemicznym, barwieniu itp. Zabiegi te mają poprawić odporność stali na działanie korozji równomiernej (im gładsza powierzchnia, tym stal odporniejsza). Przy stalach podatnych na korozję naprężeniową polerowanie mechaniczne może być jednak niekorzystne, ponieważ naprężenia spowodowane tym zabiegiem mogą inicjować pęknięcia korozyjne w środowiskach zawierających chlorki.

6.3. Własności fizyczne

Gęstość stali ferrytycznych i martenzytycznych (w tym również stali umacnianych wydzieleniowo) wynosi od 7,5 do 7,8 kg/dm³, natomiast stali austenitycznych i ferrytyczno-austenitycznych od 7,7 do 8,1 kg/dm³.

Moduł sprężystości stali ferrytycznych i martenzytycznych w 20⁰C waha się od 200 do 220 kN/mm², a stali austenitycznych i ferrytyczno-austenitycznych od 195 do 200 kN/mm².

Współczynniki rozszerzalności cieplnej, w zależności od składu chemicznego stali nierdzewnych podano przykładowo w tablicy 8a. Bardzo duża rozszerzalność cieplna stali austenitycznych jest przyczyną trudności jakie napotyka się przy ogrzewaniu i oziębianiu tych stali, zwłaszcza podczas spawania.

Tablica 8

Niektóre własności fizyczne stali odpornych na korozję (S. Bukovinsky i inni, Sandvik SAF 2205 - katalog, czerwiec 1981)

8a) współczynnik rozszerzalności cieplnej, α

| Gatunek stali | Wartość $\alpha \cdot 10^{-6} \cdot K^{-1}$ w zakresie temperatur, °C | | | | | |
|------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 20-100 | 20-200 | 20-300 | 20-400 | 20-500 | 20-600 |
| Sandvik 3RE60 | 12,2 | 13,1 | 13,5 | 14,0 | 14,2 | 14,5 |
| Sandvik SAF 2205 | 13,7 | 14,2 | 14,7 | - | - | - |
| AISI 316 L | 16,0 | 17,0 | 17,5 | 17,8 | 18,0 | 18,2 |
| Stal węglowa | 12,6 | 13,2 | 13,9 | 14,4 | 14,8 | - |

8b) współczynnik przewodności cieplnej, λ

| Gatunek stali | Wartość λ (W/m · K) w temperaturze, °C | | | | | |
|------------------|--|-----|------|-----|------|-----|
| | 20 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 |
| Sandvik 3RE60 | 20 | 20 | 22 | 24 | 25,5 | 27 |
| Sandvik SAF 2205 | 19 | 19 | - | 23 | - | - |
| AISI 316 L | 15 | 16 | 17,5 | 19 | 20 | 21 |

Przewodność cieplna stali odpornych na korozję jest mniejsza niż stali węglowych. Mniejsza wartość współczynnika przewodności cieplnej stali odpornych na korozję związana jest z dużą zawartością chromu. W miarę wzrostu temperatury przewodność cieplna stali zwiększa się (tablica 8b).

Jednostkowa pojemność cieplna (ciepło właściwe) stali martenzytycznych i ferrytycznych praktycznie bardzo mało się różni od pojemności cieplnej stali węglowych i zmienia się w przedziale od 430 do 460 J/kg·K. Natomiast pojemność cieplna stali austenitycznych i stali umacnianych wydzieleniowo jest o ok. 10÷15 % większa niż stali ferrytycznych i martenzytycznych.

Elektryczny opór właściwy stali odpornych na korozję zmienia się w szerokich granicach:

od 0,60 - 1,0 $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$ (stale ferrytyczne), poprzez 0,55 - 0,8 $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$ (stale martenzytyczne

i umacniane wydzieleniowo) do 0,70 do 1,0 $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$ (stale austenityczne i ferrytyczno-austenityczne).

Magnesowalność: stale martenzytyczne (w tym umacniane wydzieleniowo), ferrytyczne i ferrytyczno-austenityczne, w przeciwieństwie do stali austenitycznych, są magnetyczne.

7. RODZAJE WYROBÓW HUTNICZYCH ZE STALI ODPORNYCH NA KOROZJĘ

7.1. Uwagi ogólne

Ze stali odpornych na korozję wykonuje się większość takich samych wyrobów hutniczych jakie wytwarzane są ze stali niżej stopowych i ze stali węglowych. Występują jednak pewne ograniczenia, wynikające z nieco innego przebiegu krystalizacji stali nierdzewnych i z mniejszej ich podatności do przeróbki plastycznej na gorąco. W szczególności ze stali odpornych na korozję nie można odlewać tak dużych wlewków jak ze stali niżej stopowych i mniejsza musi być intensywność odkształcania podczas przeróbki plastycznej na gorąco, zwłaszcza w początkowych etapach przerobu.

Dalsza różnica wynika ze znacznie wyższych wymagań jakościowych, jakie stawiane są wyrobom hutniczym ze stali nierdzewnych w porównaniu z wyrobami ze stali niżej stopowych i ze stalami niestopowymi (węglowymi). Aby spełnić wysokie wymagania jakościowe, konieczne jest stosowanie przy stalach odpornych na korozję specjalnych technologii wytapiania jak i przeróbki plastycznej na gorąco i na zimno.

Stale odporne na korozję wytapiane są obecnie przeważnie w konwertorach tlenowych i w elektrycznych piecach łukowych, przy czym piece łukowe stosowane są dzisiaj głównie tylko do roztopiania materiałów wsadowych, zaś pozostałe zabiegi metalurgiczne wykonuje się w oddzielnych urządzeniach pozapiecowej obróbki metalurgicznej stali.

Celem dalszego podwyższenia jakości stali nierdzewnych, zwłaszcza tych przeznaczonych do specjalnych zastosowań, stosowane jest nieraz powtórne przetapianie stali metodą elektrożużłową lub w piecach próżniowych.

7.2. Produkcja wyrobów hutniczych ze stali nierdzewnych

7.2.1. Odlewanie stali odpornych na korozję

Ciekła stal nierdzewna odlewana jest tak jak inne rodzaje stali dwoma metodami: metodą tradycyjną, do form żeliwnych zwanych wlewnicami, w sposób ciągły, do miedzianego, z obu stron otwartego, silnie chłodzonego krystalizatora, z którego uzyskuje się skrzepnięte pasmo stali o znacznej długości. Długie pasma stali otrzymane w procesie ciągłego odlewania (COS) cięte są na odcinki o długości dostosowanej do posiadanych pieców grzewczych i możliwości urządzeń walcowniczych.

7.2.2. Przeróbka plastyczna na gorąco stali nierdzewnych

Wlewki, w tym też ze stali nierdzewnej, przerabiane są plastycznie dwoma metodami: przez kucie, przez walcowanie na gorąco.

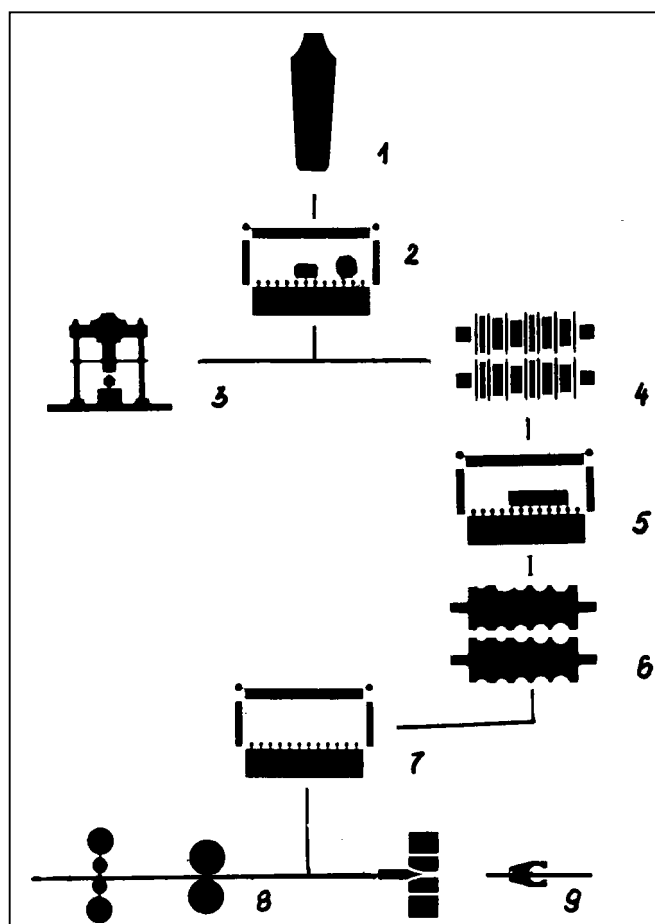
7.2.2.1. Kucie wlewków

Wlewki ze stali nierdzewnych poddaje się kuciu w dwóch przypadkach: gdy potrzebne są pręty o znacznych wymiarach przekroju poprzecznego, których ze względu na dużą średnicę nie można odwalcować (np. pręty przeznaczone do wyrobu dużych wałów nierdzewnych), gdy ma być przerabiany plastycznie gatunek stali nierdzewnej o szczególnie małej podatności do przeróbki plastycznej na gorąco. Wtedy najtrudniejszy, pierwszy etap przeróbki plastycznej wykonuje się z zastosowaniem kucia, natomiast dalsze odkształcanie plastyczne półwyrobu (w postaci kęsiska lub kęsa kutego) wykonuje się przez walcowanie, które jest już możliwe, gdyż podczas wstępnego kucia zniszczona została struktura pierwotna wlewka, utrudniająca przeróbkę plastyczną na gorąco.

7.2.2.2. Walcowanie wlewków

Najczęściej wlewki oraz półwyroby otrzymane przez ciągłe odlewanie stali nierdzewnych przerabiane są plastycznie na gorąco wyłącznie przez walcowanie.

Technologie otrzymywania wyrobów hutniczych ze stali nierdzewnych są zróżnicowane i zależą głównie od wyposażenia technicznego jakim dysponują poszczególne huty. Dla przykładu na rys.10 przedstawiono schemat tradycyjnej technologii przeróbki plastycznej stali nierdzewnej jaka stosowana jest w hucie Baildon.

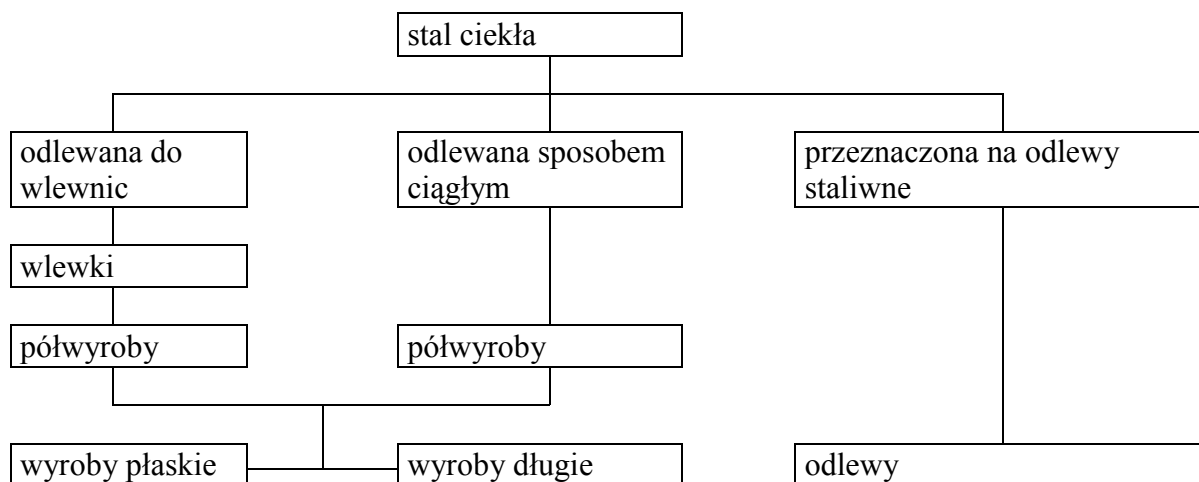


Rys.10 Schemat przeróbki plastycznej stali nierdzewnych w Hucie Baildon
 Wlewk tradycyjny przygotowany do przeróbki plastycznej na gorąco,
 Piec grzewczy do nagrzewania wlewków do przeróbki plastycznej na gorąco,
 Przeróbka plastyczna na gorąco przez kucie (na prasie lub pod młotem),
 Walcarki do walcowania wlewków na kęsiska i kęsy,
 Piec do podgrzewania kęsisk i kęsów do dalszego walcowania,
 Walcarki do walcowania końcowego prętów, bednarki i walcówki,
 Piec do obróbki cieplnej (wyżarzanie stali martenzytycznych i ferrytycznych oraz
 przesycanie stali austenitycznych),
 Walcarki do walcowania na zimno taśm,
 Ciągarki do drutów i prętów.

7.3. Nazewnictwo wyrobów hutniczych

Nazwy wyrobów hutniczych ze stali nierdzewnych są takie same jak wyrobów z innych rodzajów stali. Definicje wyrobów hutniczych podawane się w normach dotyczących terminologii wyrobów. Najbardziej aktualny opis cech i nazw wyrobów hutniczych, w tym też ze stali odpornych na korozję zawiera norma europejska EN 10079, przyjęta do stosowania w krajach Unii Europejskiej w 1992 roku. Polska wersja językowa tej normy PN-EN 10079 wydana została w marcu 1996 roku. Poniżej omówiono wybrane zagadnienia normy PN-EN 10079 w zakresie związanym ze stalami odpornymi na korozję. Fragmenty zaznaczone pismem ukośnym (kursywą) są uwagami i komentarzami pochodzącymi od autorów opracowania.

Ogólny podział wyrobów hutniczych według PN-EN 10079 przedstawiono na rys. 11.



Rys. 11 Ogólny podział wyrobów hutniczych według normy PN-EN 10079

7.3.1. WLEWKI są to wyroby znajdujące się w stanie lanym, przeznaczone do dalszego przerobu na półwyroby lub bezpośrednio na wyroby płaskie i na wyroby długie (o większych wymiarach przekroju poprzecznego). Ze względu na kształt poprzeczny, wlewki dzielą się na:

kwadratowe,
 prostokątne, o szerokości mniejszej od dwukrotnej grubości,
 płaskie, o szerokości większej od dwukrotnej grubości,
 wieloboczne, np. 6-kątne,
 okrągłe (dość popularne w polskich hutach stali nierdzewnych).

Dotychczas za podstawową cechę wlewków uważano stan lany. W stanie lanym znajdują się też wyroby otrzymane przez ciągłe odlewanie stali, które jednak w PN-EN 10079 nie są nazywane wlewkami (np. ciągłymi), a zaliczone zostały do półwyrobów.

7.3.2. PÓLWYROBY są to wyroby otrzymane:

przez wstępną przeróbkę plastyczną wlewków, przeznaczone do dalszego przerobu na wyroby płaskie lub na wyroby długie przez walcowanie lub kucie jak też przeznaczone do wyrobu odkuwek,

wyroby otrzymane przez ciągłe odlewanie stali.

Półwyroby dzielą się na:

półwyroby kwadratowe, o bokach przekroju poprzecznego powyżej 50 mm,
 półwyroby prostokątne, o powierzchni przekroju poprzecznego powyżej 2500 mm² i o szerokości mniejszej od dwukrotnej grubości,
 półwyroby płaskie, o grubości powyżej 50 mm,
 półwyroby okrągłe, o przekroju poprzecznym okrągłym, odlewane w sposób ciągły lub odkute z wlewków.

W dotychczasowej terminologii polskiej dla półwyrobów wstępnie przerobionych plastycznie stosowane są określenia „kęsiska” i „kęsy”, których to nazw norma PN-EN 10079 nie wymienia.

7.3.3. WYROBY są to gotowe wyroby hutnicze, o kształtach i wymiarach odpowiadających warunkom podanym w zamówieniach.

Wyroby hutnicze dzielą się na:

wyroby płaskie,
 wyroby długie.

7.3.3.1. Wyroby płaskie

Wyroby płaskie mają prostokątny przekrój poprzeczny, o szerokości znacznie większej od grubości. Jedną z grup wyrobów płaskich są **wyroby płaskie walcowane na gorąco o nieuszlachetnionej powierzchni**, które dzielą się na:

blachy walcowane na gorąco,

taśmy walcowane na gorąco.

Z tą częścią terminologii należy zapoznać się szczególnie dokładnie, gdyż wyjaśnia różnice między blachami arkuszowymi walcowanymi na gorąco a taśmami walcowanymi na gorąco.

Blacha walcowana na gorąco jest wyrobem płaskim o szerokości powyżej 600 mm, o brzegach *naturalnych powstałych podczas procesu walcowania* (swobodnie formowanych) lub o brzegach ciętych. Blachę walcowaną na gorąco dostarcza się zwykle w postaci arkuszy prostokątnych lub kwadratowych, otrzymanych przez:

podzielenie pasma stali wyprodukowanego w walcierce nawrotnej - jest to „blacha kwarto”,
pocięcie szerokiej taśmy odwalcowanej na gorąco w walcowni ciągłej - blachy takie nazywane są nieraz „blachą taśmową”.

Ze względu na grubość, rozróżnia się blachy i taśmy:

grube, o grubości 3 mm i większej,

cienkie, o grubości poniżej 3 mm.

Taśma walcowana na gorąco według normy PN-EN 10079 tym się różni od blachy, że po walcowaniu na gorąco zwijana jest w postaci kręgów. *Jest to definicja odbiegająca od dotychczasowego polskiego podziału, według którego termin „taśma” odnosi się wyłącznie do zwiniętych w kręgi wyrobów walcowanych na zimno.*

Taśma walcowana na gorąco w znaczeniu normy PN-EN 10079 dzieli się na:

taśmę walcowaną na gorąco o szerokości powyżej 600 mm,

taśmę o szerokości mniejszej od 600 mm, uzyskanej przez wzdłużne cięcie taśmy o szerokości powyżej 600 mm,

taśmę wąską, zwaną też bednarką, o szerokości poniżej 600 mm, uzyskanej bezpośrednio w czasie walcowania na gorąco.

Wyroby płaskie walcowane na zimno, o nieuszlachetnionej powierzchni

Są to wyroby płaskie, których przekrój poprzeczny został zmniejszony przez walcowanie na zimno o co najmniej 25 %, *w porównaniu z przekrojem poprzecznym zastosowanego płaskiego wyrobu walcowanego na gorąco.*

Wyroby płaskie walcowane na zimno dzielą się na:

blachy walcowane na zimno o szerokości powyżej 600 mm, dostarczane w postaci arkuszy,

taśmy walcowane na zimno zwinięte w kręgi bezpośrednio po końcowym walcowaniu.

Taśmy takie dzielą się na:

walcowane na zimno taśmy szerokie, o szerokości 600 mm i powyżej,

taśmy szerokie walcowane na zimno o szerokości poniżej 600 mm, uzyskanej przez cięcie taśm o szerokości powyżej 600 mm,

taśmy wąskie walcowane na zimno, o szerokości poniżej 600 mm po walcowaniu.

Wyroby złożone

Spośród wyrobów hutniczych ze stali i stopów odpornych na korozję, do grupy **wyrobów płaskich złożonych** zaliczane są blachy i taśmy *znane w Polsce pod nazwą wyrobów platerowanych, składających się z kilku warstw o różnych własnościach. Warstwę środkową stanowi przeważnie stal zwykła, zaś warstwy zewnętrzne są ze stali lub stopów nierdzewnych lub żaroodpornych.* Połączenie warstw uzyskuje się przez walcowanie na gorąco, rzadziej przez napawanie lub sposobem wybuchowym.

7.3.3.2. Wyroby długie

Wyroby długie charakteryzują się jednakowym przekrojem poprzecznym na całej długości wyrobu i tym, że nie odpowiadają definicji ustalonej dla wyrobów płaskich.

Do wyrobów długich zalicza się:

pręty kształtowane na gorąco,
walcówkę,
drut,
kształtowniki walcowane na gorąco,
kształtowniki gięte na zimno,
kształtowniki zamknięte,
wyroby rurowe.

Pręty kształtowane na gorąco otrzymuje się zwykle przez walcowanie, rzadziej przez kucie.

Pręty walcowane na gorąco mogą być:

okrągłe, o średnicy od 8 mm *do około 150 mm*
kwadratowe, 6-kątne i 8-kątne, o boku powyżej 8 mm przy prętach kwadratowych i powyżej 13 mm przy prętach 6-kątnych i 8-kątnych. Maksymalny wymiar boku prętów kwadratowych wynosi 50 mm,
płaskie, o przekroju poprzecznym prostokątnym, o grubości powyżej 5 mm i o szerokości powyżej 150 mm. *W Polsce walcowane są na gorąco ze stali nierdzewnych również pręty płaskie o szerokościach znacznie mniejszych od 150 mm (płaskowniki).*

Pręty kute - są to przede wszystkim pręty kwadratowe i okrągłe otrzymane przez kucie, nie przeznaczone do dalszego przerobu na gorąco.

Wyroby o jasnej powierzchni są to:

wyroby ciągnięte, o różnym kształcie przekroju poprzecznego, otrzymane przez ciągnięcie na ciągarce prętów walcowanych na gorąco lub walcówki,
pręty łuszczone, otrzymane z okrągłych prętów walcowanych na gorąco za pomocą łuszczenia na łuszczarkach,
pręty szlifowane, otrzymane z prętów ciągniętych i łuszczonych przez szlifowanie, a w razie potrzeby również przez następne polerowanie.

Kształtowniki walcowane na gorąco

Spośród bardzo szerokiego asortymentu tego rodzaju wyrobów, ze stali odpornych na korozję produkowane są głównie kątowniki, teowniki i kształtowniki specjalne.

Kształtowniki gięte na zimno

Wykonuje się z wyrobów płaskich walcowanych na gorąco lub na zimno, metodami kształtowania na zimno takimi jak profilowanie w walcach lub rolkach, ciągnięcie, prasowanie, krawędziowanie.

Wyroby rurowe

Do grupy tej należą rury bez szwu, rury ze szwem i kształtowniki zamknięte. Rury są to wyroby otwarte na obu końcach, o przekroju kołowym lub wielobocznym.

Rury bez szwu otrzymuje się przez dziurowanie wyrobu o przekroju pełnym, np. wlewka, kęsa lub pręta z następnym przetworzeniem w rury za pomocą walcowania lub wyciskania *na gorąco*. Przekrój rur może być dalej zmniejszany za pomocą walcowania na gorąco lub na zimno, albo też za pomocą ciągnięcia.

Rury ze szwem otrzymuje się przez kształtowanie wyrobów płaskich walcowanych na gorąco lub na zimno w profil o kształcie kołowym, z następnym spajaniem (spawaniem lub zgrzewaniem) krawędzi.

Kształtowniki zamknięte są to rury wykonane procesami takimi samymi jak rury ze szwem, rzadziej tak jak rury bez szwu, o przekroju kołowym, kwadratowym lub prostokątnym. *W Polsce kształtowniki zamknięte nazywane są nieraz profilami zamkniętymi. Charakterystyczna dla kształtowników zamkniętych jest niewielka grubość ścianek.*

Inne wyroby hutnicze

Do grupy innych jeszcze wyrobów hutniczych zaliczane są odkuwki swobodnie kute i odkuwki matrycowe .

Nazewnictwo wyrobów hutniczych w językach obcych

Przeważająca część wyrobów hutniczych ze stali odpornych na korozję sprowadzana jest do Polski z zagranicy, co wymaga prowadzenia korespondencji i dokumentacji handlowej w językach obcych. Przydatny pod tym względem może być wykaz angielskich, niemieckich i francuskich odpowiedników pojęć związanych z wyrobami hutniczymi, zamieszczony w normie PN-EN 10079.

8. ZASTOSOWANIE STALI ODPORNYCH NA KOROZJĘ

Stale austenityczne stosuje się najczęściej w środowiskach wodnych o dużym stopniu agresywności, przykładowo:

w przemyśle chemicznym i petrochemicznym na urządzenia do produkcji kwasu azotowego i jego soli (zwłaszcza nawozów sztucznych), rurociągi przesyłowe, wymienniki ciepła, wieże reakcyjne,

w przetwórnictwie żywności, mleczarniach, browarach (autoklawy, pasteryzatory, beczki do piwa, rurociągi przesyłowe, wymienniki ciepła),

w konstrukcjach okrętowych i lotniczych oraz kolejowych (np. poszycia wagonów),

w gospodarstwach domowych na zlewozmywaki, elementy maszyn piorących, zmywarki do naczyń, naczynia kuchenne, stołowiznę (z wyjątkiem noży),

w inżynierii budowlanej (w tym również w architekturze) na okładziny, pokrycia dachów, drzwi, poręcze, windy, urządzenia uliczne (budki telefoniczne, przystanki autobusowe, słupki ogrodzeniowe, lampy, sanitariaty).

Stale superferrytyczne i – w ograniczonym zakresie – **stale ferrytyczne** stosuje się w :

przemyśle chemicznym na urządzenia do produkcji kwasu azotowego i jego soli, zwłaszcza na wymienniki ciepła chłodzone wodą zawierającą jony chlorkowe, wyparki, reaktory, rurociągi,

zakładach odsalania wody morskiej do budowy wymienników ciepła stykających się z wodą silnie zasoloną,

przemyśle rafineryjno-petrochemicznym na reaktory do przeróbki produktów naftowych zawierających siarkowodor, urządzenia ciągów odsiarczania ropy naftowej,

przemyśle przetwórstwa żywności na urządzenia służące do zagęszczania produktów żywnościowych zaprawionych solą oraz na inne urządzenia stykające się ze słoną żywnością,

w kopalnictwie węgla kamiennego na zbiorniki (bunkry) i rynny zsypowe,

w transporcie drogowym na układy wydechowe spalin oraz katalizatory spalin.

Stale ferrytyczno-austenityczne stosuje się przede wszystkim na: podgrzewacze, chłodnice, skraplacze, urządzenia odsalające, odsiarczające, oczyszczające (np. oczyszczalnie ścieków) w przemysłach: celulozowo-papierniczym, rafineryjno-petrochemicznym, chemicznym i innych.

Wysoka granica plastyczności stali ferrytyczno-austenitycznych czyni z nich materiał szczególnie korzystny do budowy różnego typu urządzeń, w tym: wymienników ciepła (cienkie ścianki + dobra przewodność cieplna) oraz lekkich chemikaliowców. Z kolei dobra odporność na korozję zmęczeniową sprawia, że nadają się one do budowy wirówek, suszarek łopatkowych i innych – obciążonych dynamicznie – urządzeń.

Stale tego rodzaju są szczególnie szeroko stosowane na konstrukcje i urządzenia pracujące w warunkach wody morskiej i środowiska nadmorskiego, a także przy eksploatacji zanieczyszczonych siarkowodorem i dwutlenkiem węgla szybów naftowych i gazowych, zwłaszcza morskich i przybrzeżnych.

Stale martenzytyczne stosuje się przede wszystkim w przemyśle naftowym do budowy urządzeń krakingowych, następnie do wyrobu wałów, pomp, sworzni, śrub nie stykających się bezpośrednio ze środowiskiem korozyjnym, a narażonych np. na działanie niezbyt agresywnej atmosfery wewnątrz budynków produkcyjnych. Nadają się one także do produkcji łopatek turbin parowych, zaworów pras hydraulicznych, części maszyn i form do odlewów pod ciśnieniem, narzędzi tnących, skrawających, pomiarowych, łożysk, do wyrobu elementów urządzeń narażonych na działanie wody i atmosfery morskiej.

Natomiast w przemyśle chemicznym i w jego branżach pokrewnych zakres zastosowania tego typu stali jest na ogół dość ograniczony z powodu zarówno ich niewystarczającej odporności na działanie większości środowisk korozyjnie agresywnych jak i kiepskich własności technologicznych, a zwłaszcza spawalniczych.

Stale umacniane wydzieleniowo stosuje się najczęściej w tych warunkach, w których od użytego materiału, oprócz dobrej odporności na działanie korozji, wymaga się aby stosunek wytrzymałości do masy był duży. Stosuje się je więc na części samolotów, pojazdów kosmicznych, rakiet, pocisków artyleryjskich itd. W przemyśle chemicznym i rafinerijno-petrochemicznym stali tych używa się do wyrobu zaworów bezpieczeństwa, wałów, tulei, trzpieni, śrub, bardzo wytrzymałych sprężyn i kół zębatach odpornych na działanie korozji. W przemyśle maszynowym – do wyrobu kołków i tulei rozprężnych oraz sworzni sprężynujących odpornych na korozję. W energetyce – do wytwarzania łopatek turbin, tarcz i korpusów turbin, części kompresorów i przegrzewaczy pary. Wreszcie do budowy aparatów i urządzeń przeznaczonych dla przemysłu papierniczego (holendry, młyny stożkowe i tarczowe), od których wymaga się odporności na korozję i ścieranie.

Stale umacniane wydzieleniowo nadające się do polerowania, np. stale martenzytyczne stosuje się do produkcji blach przeznaczonych do prasowania tworzyw sztucznych lub wyrobów gipsowych. Z kolei stale pólaustenityczne nadają się na elementy pomp służących do pompowania agresywnych wód kopalnianych zawierających cząstki stałe. Natomiast starzone stale austenityczne znajdują przydatność w przemyśle budowy maszyn elektrycznych, gdzie potrzebna jest zazwyczaj stal niemagnetyczna o bardzo dobrych wskaźnikach wytrzymałości, umożliwiających zmniejszenie masy urządzeń produkcyjnych.

9. STALE ŻAROODPORNE

Niektóre urządzenia i instalacje przemysłowe wykonane ze stali odpornych na korozję nagrzewają się w czasie pracy do wysokich temperatur, przekraczających nieraz nawet 1000°C. W przemyśle chemicznym i petrochemicznym, gdzie część procesów produkcyjnych prowadzona jest w wysokich temperaturach, nadal występuje tendencja do dalszego podnoszenia temperatur procesów technologicznych, gdyż przyspiesza to przebieg reakcji chemicznych a tym samym zwiększa wydajność technologiczną urządzeń.

Do wyrobu urządzeń przeznaczonych do pracy w wysokich temperaturach stosowane są stale i stopy których podstawowym składnikiem chemicznym jest żelazo lub nikiel. Tworzywa na osnowie żelaza nazywamy stalami żaroodpornymi, zaś tworzywa oparte na niklu mają ogólną nazwę żaroodpornych stopów niklu. Podstawowym warunkiem, jaki muszą spełniać stale i stopy żaroodporne jest ich bardzo dobra odporność na działanie gorących gazów i spalin w temperaturach powyżej 550°C, przy równoczesnym zachowaniu dobrych własności mechanicznych w temperaturach pracy.

Pod względem przeznaczenia stale żaroodporne dzielą się na następujące grupy:
stale żaroodporne ogólnego przeznaczenia, stosowane m.in. do budowy pieców, palenisk, kotłów i aparatury chemicznej,
stale zaworowe, stosowane na zawory silników spalinowych,
stale oporowe (na elementy oporowo-grzewcze),
stale żarowytrzymałe, które obok żaroodporności posiadają dobre własności mechaniczne w wysokich temperaturach, stosowane m.in. do budowy części do turbin gazowych i do silników odrzutowych.

Pod względem składu chemicznego stale żaroodporne różnią się od stali nierdzewnych głównie wyższą zawartością chromu i krzemu oraz dodatkiem glinu (aluminium). Te trzy pierwiastki zwiększają odporność stali na korozję gazową.

Stale żaroodporne mają mikrostrukturę ferrytyczną, austenityczną, ferrytyczno-austenityczną lub nawet martenzytyczną.

Przykłady składów chemicznych i dopuszczalnej temperatury pracy różnych rodzajów stali żaroodpornych podano w tablicy 9. Różnice w dopuszczalnych temperaturach stosowania tych samych gatunków stali, występujące między normami europejskimi EN a normami polskimi wynikają z różnych metod określania żaroodporności. Podane temperatury uwzględniają głównie odporność na działanie gorących gazów i spalin. Jeżeli równocześnie występują inne czynniki eksploatacyjne obniżające żaroodporność stali, konieczne jest obniżenie podanych dopuszczalnych temperatur pracy.

W odróżnieniu od stali nierdzewnych, posiadających na swej powierzchni w warunkach pracy (temperatura pokojowa) bardzo cienką, niewidoczną gołym okiem warstwę tlenków, stale żaroodporne wykazują wymaganą odporność na utlenienie wtedy, gdy ich powierzchnia pokryta jest grubą, dobrze widoczną i zwartą warstwą tlenków, zwaną zgorzeliną. Z tego względu gdy zezwalają na to warunki dalszego przerobu wyrobów hutniczych ze stali żaroodpornych, stale te należy zamawiać w stanie nietrawionym, gdyż pierwotna zgorzelina powstała podczas procesów hutniczych stanowi dobrą warstwę zaporową zmniejszającą szybkość dalszego narastania zgorzeliny w warunkach eksploatacji urządzeń ze stali żaroodpornych. Przy doborze gatunku stali żaroodpornej należy uwzględnić również wpływ zmian strukturalnych, zachodzących w wysokich temperaturach, na własności mechaniczne. Ferrytyczne stale żaroodporne mają dużą skłonność do rozrostu ziaren w wysokich temperaturach, co prowadzi do kruchości tych stali. Kruchość spowodowana innymi czynnikami może wystąpić również w austenitycznych stalach żaroodpornych. W stalach tych, w określonych zakresach temperatur, powstają liczne wydzielienia wielkości mikroskopowej. Gdy jest ich dużo i przekroczą wielkość krytyczną, zwłaszcza zaś gdy wydzielienia rozmieszczone są na granicach ziaren, to również stale austenityczne stają się kruche. Podwyższanie parametrów pracy urządzeń ze stali żaroodpornych pracujących w wysokich temperaturach powoduje, że w niektórych przypadkach stale te nie są już w stanie spełniać zaostrzonych wymagań i wtedy konieczne staje się zastępowanie stali żaroodpornych kilkakrotnie droższymi stopami żaroodpornymi na osnowie niklu.

Tablica 9

Przykłady składów chemicznych i dopuszczalnych temperatur stosowania różnych rodzajów stali żaroodpornych

| Max. temperatura pracy w °C wg | | Oznaczenie gatunków wg | | Średnia zawartość składników chemicznych w % | | | | | | Struktura |
|--------------------------------|------|------------------------|----------------------|--|-----|------|------|-----|-----|----------------|
| EN | PN | EN | PN | C | Si | Cr | Ni | Al | W | |
| 850 | 950 | 1.4724 | H13JS | 0,1 | 1,1 | 13,0 | - | 1,0 | | ferrytyczna |
| - | 850 | - | H9S2 | 0,4 | 2,5 | 9,0 | - | - | | martenzytyczna |
| - | 900 | - | 4H14N14W2M | 0,4 | 0,6 | 14,0 | 14,0 | | 2,5 | austenityczna |
| 1000 | 1050 | 1.4828 | H18N9S ^{/*} | 0,15 | 2,0 | 20,0 | 12,0 | - | | austenityczna |
| - | 1050 | 1.4742 | H18JS | 0,1 | 1,1 | 18,0 | - | | | ferrytyczna |
| 1100 | 1050 | 1.4864 | H16N36S2 | 0,1 | 1,5 | 16,0 | 35,0 | - | | austenityczna |
| - | 1050 | - | H23N18 | 0,12 | 0,6 | 23,0 | 18,0 | - | | austenityczna |
| 1150 | 1200 | 1.4762 | H24JS | 0,1 | 1,1 | 24,5 | - | 1,5 | | ferrytyczna |
| 1150 | 1150 | 1.4841 | H25N20S2 | 0,15 | 2,0 | 25,0 | 20,0 | - | | austenityczna |
| - | 1300 | - | H25J5 | 0,1 | - | 25,0 | - | 5 | | ferrytyczna |

^{/*} gatunek zbliżony