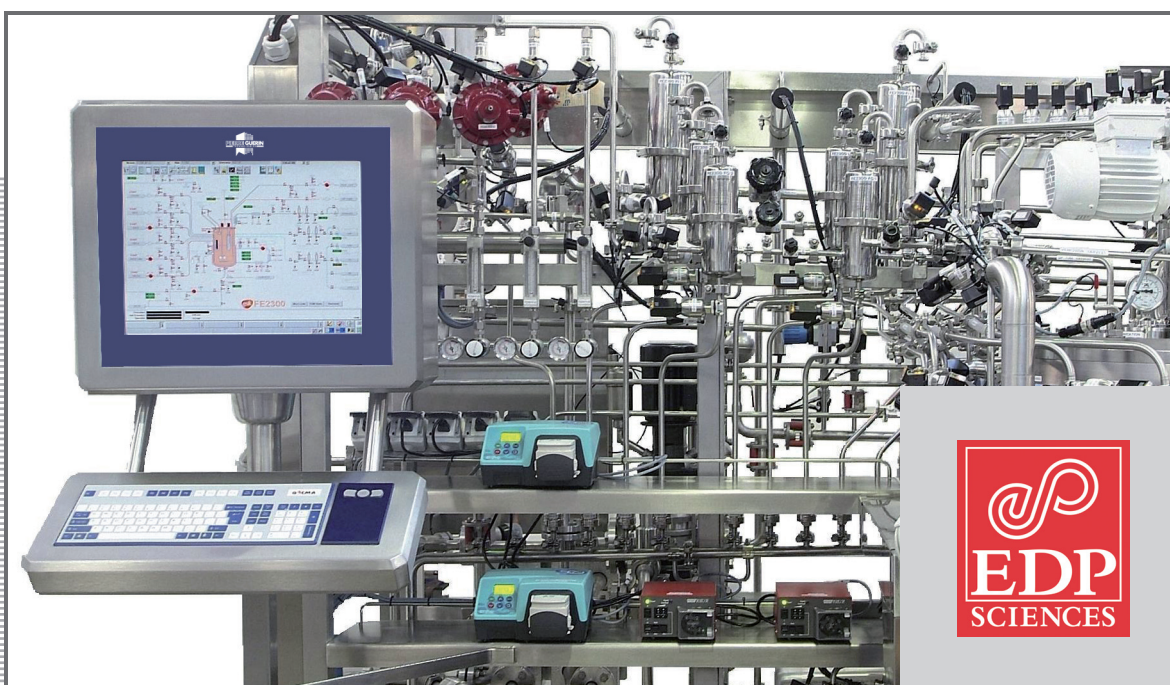


Praca ze stalą nierdzewną opracowane przez Pierre-Jean Cunat



PRACA ZE STALĄ NIERDZEWNĄ

OPRACOWANE PRZEZ

PIERRE-JEAN CUNAT

Euro Inox

Euro Inox jest europejskim stowarzyszeniem rozwoju rynku stali nierdzewnych.

Członkami Euro Inox są następujące organizacje i instytucje:

- Europejscy producenci stali nierdzewnych
- Krajowe organizacje zajmujące się rozwojem stali nierdzewnych
- Stowarzyszenia producentów dodatków stopowych.

Głównym celem Euro Inox jest rozwijanie świadomości na temat wyjątkowych własności stali nierdzewnych, propagowanie ich zastosowania oraz zdobywanie nowych rynków. Aby osiągnąć te cele, Euro Inox organizuje konferencje i seminaria oraz wydaje przewodniki w formie drukowanej i elektronicznej, co umożliwia architektom, projektantom, zaopatrzeniowcom, producentom oraz użytkownikom i producentom, a także użytkownikom końcowym lepsze zaznajomienie się z tym materiałem. Euro Inox wspiera również techniczne i rynkowe prace badawcze.

Uwagi o prawie autorskim

Opracowanie niniejsze jest objęte prawem autorskim. Euro Inox zastrzega sobie wszelkie prawa do tłumaczenia na wszystkie języki, przedruku, wykorzystania ilustracji, cytowania lub rozpowszechniania. Żadna część tej publikacji nie może zostać powielona, przechowywana w systemach wyszukiwawczych ani przekazywana w żaden inny sposób: elektroniczny, mechaniczny, za pomocą fotokopii czy nagrań bez uprzedniej pisemnej zgody właściciela praw autorskich tj. Euro Inox, Luksemburg. Naruszenie tych praw może podlegać procedurze prawnej w zakresie odpowiedzialności za wszelkie szkody pieniężne wynikające z tego naruszenia, jak również poniesienia kosztów i opłat prawnych oraz podlegać ściganiu w ramach przepisów luksemburskiego prawa autorskiego oraz przepisów obowiązujących w Unii Europejskiej.

Pierre-Jean CUNAT jest niniejszym uznawany za autora tej książki zgodnie z francuskim prawem autorskim z 11 marca, 1957, 3 lipca, 1985 i następujących: Art. L121-1 do L121-9, Art. L122-1 do L122-12, Art. L123-1 do L123-12.

Członkowie zwyczajni

Acciai Speciali Terni

www.acciaiterni.it

Acerinox

www.acerinox.com

Aperam

www.aperam.com

Outokumpu

www.outokumpu.com

Członkowie stowarzyseni

Acroni

www.acroni.si

British Stainless Steel Association (BSSA)

www.bssa.org.uk

Cedinox

www.cedinox.es

Centro Inox

www.centroinox.it

ConstruirAcier

www.construiracier.fr

Industeel

www.industeel.info

Informationsstelle Edelstahl Rostfrei

www.edelstahl-rostfrei.de

International Chromium Development Association (ICDA)

www.icdacr.com

International Molybdenum Association (IMOA)

www.imoa.info

Nickel Institute

www.nickelinstitute.org

Paslanmaz Çelik Derneği (PASDER)

www.turkpasder.com

Polska Unia Dystrybutorów Stali (PUDS)

www.puds.pl

Stowarzyszenie Stal Nierdzewna

www.stalnierdzewne.pl

SWISS INOX

www.swissinox.ch

Praca ze stalą nierdzewną
Wydanie pierwsze, 2013
ISBN 978-2-87997-185-8
© EDP Sciences i Euro Inox 2013
ISBN 978-2-87997-185-8
Wersja angielska ISBN 978-2-87997-181-0
Wersja holenderska ISBN 978-2-87997-182-7
Wersja turecka ISBN 978-2-87997-186-5

Wydawca

EDP Sciences, 17 Avenue du Hoggar
P.A. de Courtabœuf, BP112
91944 Les Ulis Cedex A, Francja
Tel.: +33 1 69 18 17 62 / Fax +33 1 69 86 07 65
www.edpsciences.org

Euro Inox

Biuro główne:
21st Century Building
19, rue de Bitbourg
1273 Luxemburg, Księstwo Luxemburg
Tel.: +352 26 10 30 50 / Fax: + 352 26 10 30 51

Biuro wykonawcze:

Diamant Building, Bd. A. Reyers 80
1030 Bruksela, Belgia
Tel.: +32 2 706 82 67 / Fax: +32 2 706 82 69
info@euro-inox.org
www.euro-inox.org

Autor

Napisana i zredagowana przez Pierre'a-Jeana Cunata,
Joinville-le-Pont (Francja), z pomocą
"Compagnons du Devoir du Tour de France"
Przetłumaczone z francuskiego przez Dr inż. Jamesa H.
Davidsona (†)
Polskie tłumaczenie Dr inż. Zbigniew Brytan
CTP, Warszawa, Polska

Spis treści

Wstęp

Przedmowa

1. Stale nierdzewne
 - 1.1 Typy korozji
 - 1.2 Grupy stali nierdzewnych
 - 1.3 Dobór gatunku stali nierdzewnej
 - 1.4 Obróbka cieplna
 - 1.5 Dostępne na rynku produkty ze stali nierdzewnej
2. Praca ze stalą nierdzewną
 - 2.1 Cięcie – cięcie termiczne
 - 2.2 Obróbka skrawaniem
 - 2.3 Obróbka plastyczna na zimno
 - 2.4 Obróbka plastyczna na gorąco
3. Technologie łączenia
 - 3.1 Spawanie
 - 3.2 Lutowanie lutem miękkim i twardym
 - 3.3 Klejenie
 - 3.4 Połączenia mechaniczne
4. Stan powierzchni
 - 4.1 Charakterystyka powierzchni
 - 4.2 Przygotowanie i obróbka powierzchni
5. Badania i kontrola
 - 5.1 Badania metalurgiczne
 - 5.2 Badania własności mechanicznych
6. Załączniki
 - 6.1 Własności fizyczne i struktura stali nierdzewnych
 - 6.2 Rozpoznawanie i oznaczenia stali nierdzewnych
 - 6.3 Skorowidz i wykaz skrótów
 - 6.4 Spis zdjęć i informacje o ich autorach
 - 6.5 Literatura

Zastrzeżenie

EDP Sciences i Euro Inox dołożyły wszelkich starań, aby informacje zawarte w tej publikacji były technicznie poprawne. Jednakże, zwraca się uwagę czytelnika, że materiał zawarty w niniejszym opracowaniu stanowi tylko ogólną informację. Recenzenci EDP Sciences, oraz Euro Inox i jego członkowie, personel i konsultanci nie ponoszą żadnej odpowiedzialności za jakiegokolwiek straty, zniszczenia lub szkody wynikające z wykorzystania informacji zawartych w niniejszym opracowaniu.

Wstęp do wydania drugiego

Bez wątplenia żelazo i wiedza o jego obróbce odegrały decydującą rolę w zdobyciu przez człowieka dominacji nad naturą oraz jego rozwoju cywilizacyjnym. Powszechnie uważa się, że już Hetyci i ludy zamieszkujące Kaukaz posiadali umiejętności pozyskiwania żelaza z hematytu, już w 1700 p.n.e. Jednak żelazo w formie odlewanej, które jest zasadniczo stopem żelaza z węglem nie występowało przed około 1300 rokiem n.e., a przemysłowa produkcja stali w rzeczywistości stała się ważną gałęzią przemysłu dopiero w XIX wieku. Pomimo, że stal jest obecnie szeroko znana i stosowana w przemyśle ciężkim to wiedza na jej temat oraz znajomość jej prawidłowego stosowania jest wciąż słaba w małych i średnich przedsiębiorstwach oraz małych zakładach produkcyjnych. W celu spełnienia tych potrzeb powstał wydany w 1998 roku podręcznik „Praca ze stalą nierdzewną – podręcznik dla rzemieślników i techników”.

Historia stali nierdzewnych jest bardziej współczesna, pierwsze przemysłowe zastosowania datuje się na około 1910 rok. Od tej pory stale nierdzewne stały się dobrze znane z powodu ich wyjątkowej odporności korozyjnej, atrakcyjnego wyglądu oraz trwałości powierzchni elementów. Pomimo tego wciąż istnieje konieczność lepszego poznania, nie tylko charakterystycznych własności stali nierdzewnych, w tym ich odporności na korozję i na utlenianie oraz własności mechanicznych w wysokiej temperaturze, wraz z wszystkimi innymi własnościami wymaganymi dla prawidłowego zastosowania, jako materiał konstrukcyjny, lecz także bardziej szczególnych własności, takich jak zdolność do odkształcenia w wyniku różnych procesów

obróbki plastycznej na zimno i na gorąco oraz różnych metod łączenia.

Jak już wcześniej wspomniano celem podręcznika „Praca ze stalą nierdzewną” jest dostarczenie podstawowej wiedzy na temat samego materiału i umiejętności posługiwania się nim, koniecznych do prawidłowego doboru materiału i jego wdrożenia, starając się, aby informacje te były przedstawione w łatwo dostępnym i praktycznym sposób.

Powstanie tej publikacji nie było by możliwe bez doświadczenia i entuzjazmu Rogera Drouhina (t), dyrektora naczelnego Societe d’Ingenierie, de Recherche, de Prospective et d’Edition.

Podręcznik „Praca ze stalą nierdzewną” jest wynikiem tej wieloletniej współpracy i bez wątpienia spełnia przypisane mu cele.

Pierre-Jean CUNAT

Przedmowa

Początki historii stali nierdzewnych są ściśle związane z chromem i pracami francuskiego chemika Nicolasa Louisa Vauquelina (1763-1829), które doprowadziły do odkrycia tego metalu w 1797 roku.

Berthier w 1821 roku, jako pierwszy zaobserwował własności „nierdzewne” stopów żelaza z chromem.

Jednak najwcześniejsze systematyczne badania stopów żelaza z chromem wykonał L. Guillet we Francji (1904) i W. Giesen w Niemczech (1909). W 1909 roku Guillet opublikował wyniki badań nad stopami Fe-Cr i Fe-Cr-Ni i sklasyfikował je względem struktury, jako martenzytyczne (13%Cr), ferrytyczne (17%Cr) i austenityczne (18%Cr-8%Ni).

Badania te nie znalazły jednak odzwierciedlenia w produkcji przemysłowej aż do roku 1910.

Nazwisko angielskiego metalurga z Sheffield, Harry’ego Brearley’a jest ściśle związane z pierwszą przemysłową produkcją martenzytycznych stali nierdzewnych w roku 1913.

Dodatkowo oprócz wymienionych osób, obecnie uznaje się wśród głównych prac badawczych zmierzających do opracowania stali nierdzewnych wykonanych w latach 1900 i 1950, prace należące do A. Portevina (1903) we Francji i P. Monnartza, B. Straussa i E. Maurera (1912) w Niemczech.

Pomimo tego, że we wspomnianym okresie wykonano tak liczne prace badawcze to dopiero pół wieku później stale nierdzewne zaczęto wytwarzać na prawdziwie przemysłową skalę produkcyjną. Głównymi trudnościami, jakie napotkano podczas wytwarzania tych stopów było utrzymanie na odpowiednim poziomie niektórych pierwiastków stopowych w szczególności chromu i węgla.

Od końca 1920 roku różne formy produktów ze stali nierdzewnych weszły do powszechnego użytku w zastosowaniach architektonicznych. Jednym z najbardziej znanych zastosowań jest dach budynku Chryslera w Nowym Jorku, który został pokryty wyprodukowaną w Europie blachą ze stali 18%Cr-9%Ni.

Pomimo agresywnej atmosfery, jaka panuje w Nowym Jorku, o charakterze mieszanym miejskim i nadbrzeżnym, dach jest ciągle w doskonałym stanie po prawie dziewięćdziesięciu latach eksploatacji.

Kolejnym przykładem z tego samego okresu (1928-1930) jest konstrukcja stalowa zastosowana do wzmocnienia kopuły Saint Paul’s w Londynie złożona z okrągłego pierścienia oraz prętów łączących zewnętrzne i wewnętrzne powierzchnie konstrukcji. Stal nierdzewna została tu zastosowana zarówno ze względu na odporność korozyjną jak i własności mechaniczne. Tak jak w poprzednim przypadku, materiał do dziś dzień jest w doskonałym stanie i całkowicie spełnia powierzone mu funkcje.

Wśród bardziej imponujących konstrukcji godną uwagi jest La Geode w parku Nauki i Techniki La Villette w Paryżu wybudowana w 1985 roku.

Jest to kula o średnicy 36 metrów złożona z 6433 trójkątów z blachy o grubości 1,5 mm, z austenitycznej stali nierdzewnej gatunku 17%Cr-11,5%Ni-2%Mo. W celu uzyskania odpowiedniego efektu zastosowano „polerowanie lustrzane” powierzchni, co nadało całej konstrukcji bardzo wysoki współczynnik odbijania światła.

Najnowszym przykładem jest znajdująca się w Brukseli konstrukcja przedstawiająca model atomu – Atomium, wybudowana w 1958 roku i poddana pełnej renowacji warstwy zewnętrznej poszycia w roku 2005. W tym

czasie na okładzinę konstrukcji zastosowano 1,2 mm blachę ze stali nierdzewnej typu X2CrNiMo17-12-2/1.4404, z której powycinano i uformowano setki trójkątnych elementów poszycia. W celu zapewnienia odpowiedniej gładkości powierzchni i odporności na przywieranie obcych cząstek elementy były polerowane elektrolitycznie. Oczywiście, technika ta zapewnia również łatwość w czyszczeniu oraz atrakcyjne i trwale połyskujące lustrzane wykończenie powierzchni.

Wiele ze specjalnych wymagań, prezentowanych w publikacji, dla szczególnych zastosowań stali nierdzewnych zostało wska-

zane przez członków cechu rzemieślników Messrs.

Prusvot, Robinet i Gaubert wraz ze ścisłą koordynacją Andre Malicota zasugerowali, że kolejne wydanie „Praca ze stalą nierdzewną” powinno być nawet bardziej związane z rzeczywistymi problemami napotykanymi w przypadku tych materiałów, w warunkach warsztatowych. Z tego względu składam również podziękowania dla “Compagnons du Devoir” za wkład w przygotowanie niniejszej publikacji.

Pierre-Jean CUNAT

1 Stale nierdzewne

1.1 Typy korozji

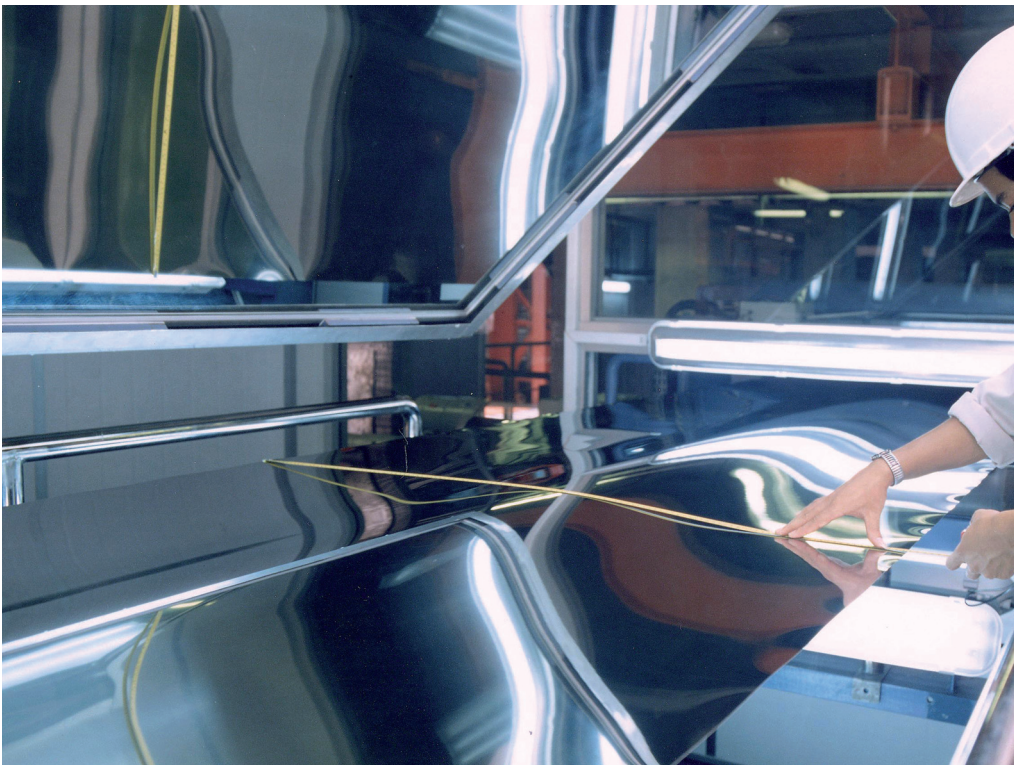
Korozją nazywamy zmiany zachodzące w metalach i ich stopach, w wyniku oddziaływania z otaczającym środowiskiem. Atak korozyjny rozpoczyna się na powierzchni metalu, to znaczy na granicy styku ze środowiskiem i następnie postępuje w głąb materiału w wyniku różnych mechanizmów.

Spośród materiałów metalowych, jakie przeciwstawiają się działaniu korozji, stale nierdzewne wykazują wysoką odporność korozyjną w wielu różnych ośrodkach korozyjnych z powodu występowania zjawiska znanego *pasywacją*. Polega ono na powstawaniu na powierzchni stali nierdzewnej bardzo cienkiej *warstwy pasywnej*, która jest ściśle związana z podłożem i zapobiega dalszemu

kontaktowi między metalem a mniej lub bardziej agresywnym środowiskiem otoczenia.

W celu wystąpienia zjawiska pasywacji, stale nierdzewne muszą zawierać minimalnie 11% Cr. Ponadto przy takim stężeniu chromu, jeżeli warstwa pasywna zostanie miejscowo uszkodzona, na przykład w wyniku zarysowania, to wykazuje ona charakterystyczną własność do samoczynnego odbudowania się w wielu różnych środowiskach. Jeżeli jednak gatunek stali nierdzewnej zostanie niewłaściwie dobrany do danego medium korozyjnego, może nastąpić *przebicie warstwy pasywnej* i wystąpi korozja materiału.

Istnieje kilka charakterystycznych typów korozji, które opisano poniżej.



Zdjęcie 1: Linia do wyżarzania jasnego – stanowisko kontroli.

Zdjęcie 2: Atomium, Bruksela. Odnowiona konstrukcja jest obecnie pokryta panelami wielowarstwowymi typu sandwich z warstwą zewnętrzną z 1,2 mm blachy stali nierdzewnej gatunku X2CrNiMo17-12-2 / 1.4404 (B)



Korozja równomierna

Korozja równomierna stali nierdzewnych występuje jedynie wtedy, gdy znajduje się ona w stanie aktywnym, to znaczy, kiedy warstwa pasywna jest niestabilna. W tym przypadku rozpuszczanie powierzchni przebiega równomiernie na całej powierzchni materiału, prowadząc do stałego zmniejszania grubości i ubytku masy.

Dane dotyczące korozji równomiernej są zebrane w tablicach odporności na korozję, które

dostarczają informacji o zachowaniu się stali nierdzewnych w różnych *środowiskach kwaśnych*, generalnie wolnych od zanieczyszczeń. Dane te nie opisują wszystkich możliwych środowisk korozyjnych, w których można stosować stale nierdzewne. Stanowią jedynie pomoc przy wstępnym doborze materiału, który następnie powinien być skonsultowany ze specjalistą od zagadnień korozyjnych.

Korozja lokalna

Stale nierdzewne mogą ulegać różnym typom korozji lokalnej, takim jak korozja wżerowa,

szczelinowa, międzykrystaliczna i korozja naprężeniowa.

Korozja wżerowa

Ten typ ataku korozyjnego występuje w bardzo ograniczonym obszarze powierzchni sta-

li, podczas gdy pozostały obszar pozostaje chroniony przez warstwę pasywną. Następuje

lokalne uszkodzenie warstwy pasywnej i brak samoczynnego odbudowania się jej w tych miejscach. Powstają *wżery*, które mogą doprowadzić do całkowitej perforacji metalu. Należy, więc koniecznie unikać wystąpienia takiego zjawiska przez właściwy dobór gatunku stali nierdzewnej do dominujących warunków eksploatacyjnych (rys. 1.1.1)

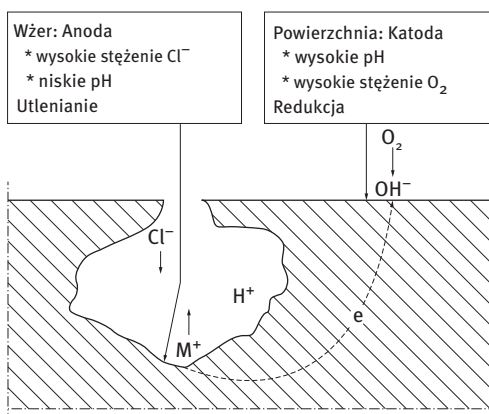
Środowiskiem korozyjnym, które najbardziej sprzyja powstawaniu korozji wżerowej jest woda morska. Niemniej jednak, zarówno woda „kranowa” jak i woda „słodka” – spożywcza również mogą być agresywne korozyjnie. Do czynników wpływających na odporność na korozję wżerową należą:

- stan powierzchni materiału (korzystna jest niska chropowatość powierzchni);
- główne dodatki stopowe: chrom, molibden i nikiel;
- śladowe dodatki innych pierwiastków stopowych, które mają na celu modyfikowanie obecnych w materiale wtrąceń niemetalicznych.

Pod względem elektrochemicznym, na krzywej polaryzacji anodowej występuje *krytyczny potencjał tworzenia się wżerów* korozyjnych, poniżej którego może wystąpić korozja lokal-

na. Dla danego środowiska korozyjnego (np. wody kranowej, wody morskiej), potencjał tworzenia się wżerów można zastosować do sklasyfikowania różnych gatunków stali pod względem ich odporności na ten typ korozji.

W tabelicy 1.1.1 zestawiono wyniki badań korozyjnych w wodzie kranowej o temperaturze 25 °C, o typowej zawartości NaCl poniżej 1,2g/l (stężenie molowe rzędu 0,02M) i wartości pH 6,6. Ponadto podano wartości dla wiele bardziej agresywnej wody morskiej o temperaturze 70 °C z zawartością NaCl rzędu 30g/l (0,5M).



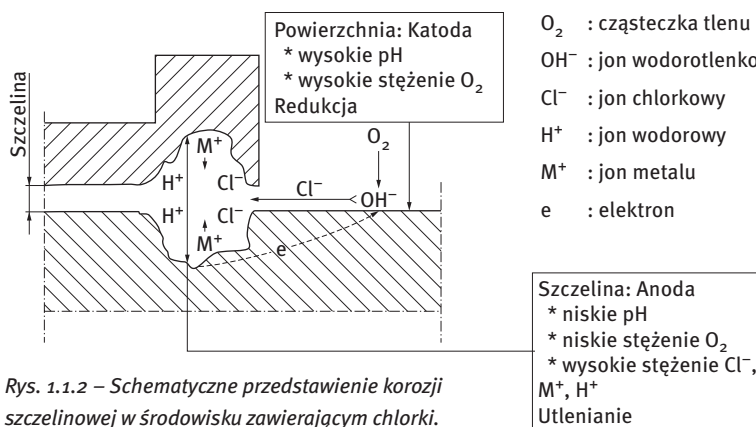
Rys. 1.1.1 – Schematyczne przedstawienie procesów podczas rozwoju wżeru w środowisku zawierającym chlorki.

- O₂ : cząsteczka tlenu
- OH⁻ : jon wodorotlenkowy
- Cl⁻ : jon chlorkowy
- H⁺ : jon wodorowy
- M⁺ : jon metalu
- e : elektron

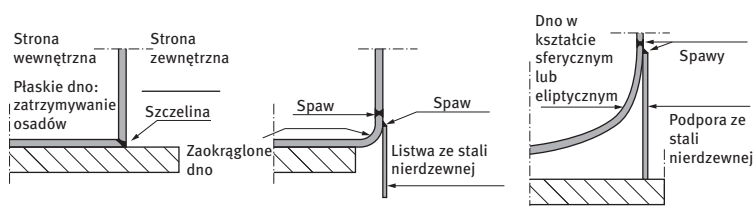
Gatunek: oznaczenie znormalizowane EN 10088-2	Wskaźnik odporności korozyjnej (w funkcji potencjału tworzenia się wżerów)	
	Woda kranowa	Woda morska
X6Cr17 / 1.4016	2,5	
X3CrTi17 / 1.4510	4,5	0,5
X2CrMoTi18-2 / 1.4521	7,0	2,0
X2CrNi19-11 / 1.4306	5,0	1,0
X2CrNiMo22-5-3 / 1.4462		4,0
X2CrMoTi29-4 / 1.4592		6,0 (brak wżerów)

Tablica 1.1.1 – Odporność na korozję wżerową różnych gatunków stali nierdzewnych w wodzie kranowej oraz wodzie morskiej

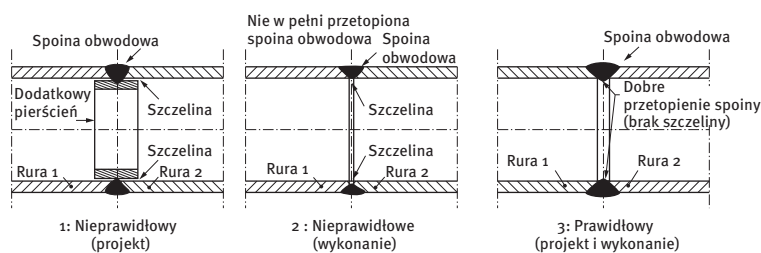
(*) Mol jest jednostką ilości substancji, która zawiera jeden gram masy cząsteczkowej tej substancji. Jeden mol każdej substancji zawiera 6,10²³ (liczba Avogadra) cząsteczek lub atomów. Stężenie molowe jest liczbą moli substancji zawartej w 1 litrze roztworu.



Rys. 1.1.2 – Schematyczne przedstawienie korozji szczelinowej w środowisku zawierającym chlorki.



Rys. 1.1.3 – Projekt spawanego dna zbiornika.



Rys. 1.1.4 – Rury spawane doczołowo.

Wartość pH depasywacji	Kwasowość	Gatunek: oznaczenie znormalizowane EN 10088-2
1	Bardzo wysoka	X2CrNiMo22-5-3 / 1.4462
1,1		X2CrMoTi29-4 / 1.4592
1,2		X1NiCrMoCu25-20-5 / 1.4539
1,8	Wysoka	X2CrNiMo17-12-2 / 1.4404
2,1		X5CrNi18-10 / 1.4301
2,5		X3CrTi17 / 1.4510
3,0	kowana	X6Cr17 / 1.4016

Tablica 1.1.2 – Wartości pH depasywacji w roztworze normalnym głównych gatunków stali nierdzewnych.

Korozja szczelinowa

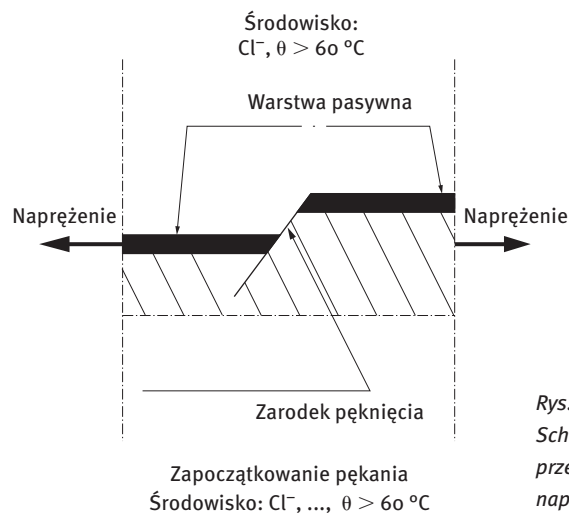
Korozja szczelinowa występuje w *szczelinach* lub ograniczonych wymiarowo przestrzeniach, które mogą występować w konstrukcjach elementów lub ujawniać się podczas eksploatacji oraz w osadach tworzących się podczas pracy na powierzchni materiału (rys. 1.1.2). W zamkniętym lub ograniczonym wymiarowo obszarze wewnątrz szczeliny gromadzą się związki chemiczne, co w efekcie prowadzi do stopniowego zakwaszania środowiska, ułatwiając uszkodzenie pasywnej warstwy tlenków. Jeśli w takim obszarze wartość pH* osiągnie wartość krytyczną – pH* depasywacji, rozpocznie się proces korozji. Czas inkubacji do wystąpienia korozji zależy od kształtu szczeliny. Wartość pH depasywacji jest stosowana do określania odporności stopu na korozję szczelinową – im niższe pH depasywacji, tym wyższa odporność korozyjna. W tablicy 1.1.2 podano wartości pH depasywacji dla głównych gatunków stali nierdzewnych w roztworze normalnym.

Korozji szczelinowej można zapobiegać przez:

- właściwą konstrukcją elementów, unikać występowania szczelin (rys. 1.1.3 i 1.1.4);
- systematyczne usuwanie z powierzchni stałych osadów powstałych podczas eksploatacji;

(*) Wartość pH jest miarą kwasowości lub stężenia jonów wodorowych w roztworach wodnych. Wartość pH roztworu obojętnego wynosi 7, natomiast roztworu kwaśnego jest znacznie niższe np. 3, natomiast wartości wyższe od 7 wskazują roztwory alkaliczne (zasadowe). Z definicji pH jest opisane skalą logarytmiczną to znaczy, że zmiana o jednostkę wartości pH odpowiada dziesięciokrotnej różnicy w stężeniu.

- c) unikanie stosowania połączeń gumowych, z uwagi na słabą adhezję do metalu i tworzenie się szczelin;
- d) właściwy dobór materiału. Austenityczne stale nierdzewne (stopy Fe-Cr-Ni) wykazują wyższą odporność korozyjną niż gatunki stali ferrytycznych (stopy Fe-Cr). Głównym pierwiastkiem stopowym, stosowanym do zwalczania korozji szczelinowej, jest molibden (ferrytyczna stal nierdzewna Fe-18% Cr-2% Mo wykazuje wyższą odporność korozyjną niż austenityczny stop Fe-18% Cr-8% Ni).

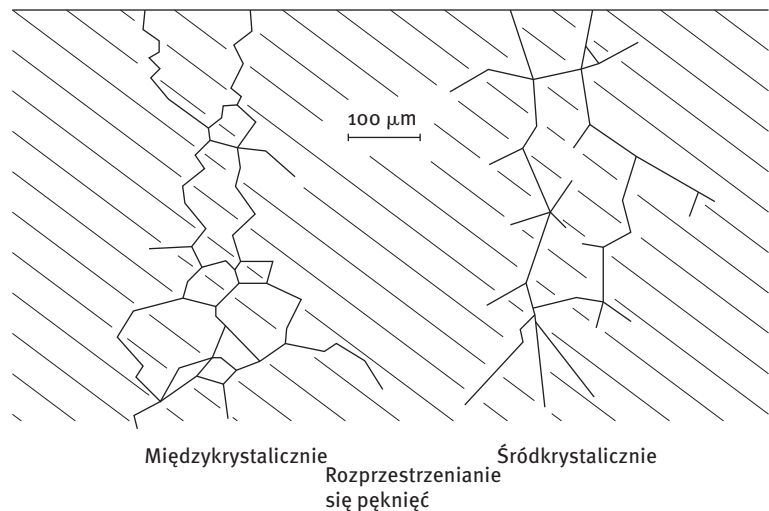


Rys. 1.1.5 – Schematyczne przedstawienie korozji naprężeniowej.

Korozja naprężeniowa

Korozja naprężeniowa jest powodowana równoczesnym oddziaływaniem obciążeń mechanicznych i specyficznego środowiska korozyjnego. Proces ten prowadzi do inicjacji pęknięć, które nawet po bardzo długim czasie inkubacji szybko rozprzestrzeniają się, powodując uszkodzenie elementów (rys. 1.1.5). Zjawisko to jest trudne do wykrycia przed etapem, w którym osiągnie stan zagrażający sprawności instalacji. Do metod zapobiegających wystąpieniu korozji naprężeniowej należą:

- a) stosowanie, kiedy tylko jest to możliwe, ferrytycznych gatunków stali, które z reguły są niewrażliwe na ten rodzaj korozji;
- b) zastosowanie austenityczno-ferrytycznych stali typu duplex lub stopów austenitycznych o wysokim stężeniu niklu i molibdenu, w przypadku gdy środowisko korozyjne jest agresywne;

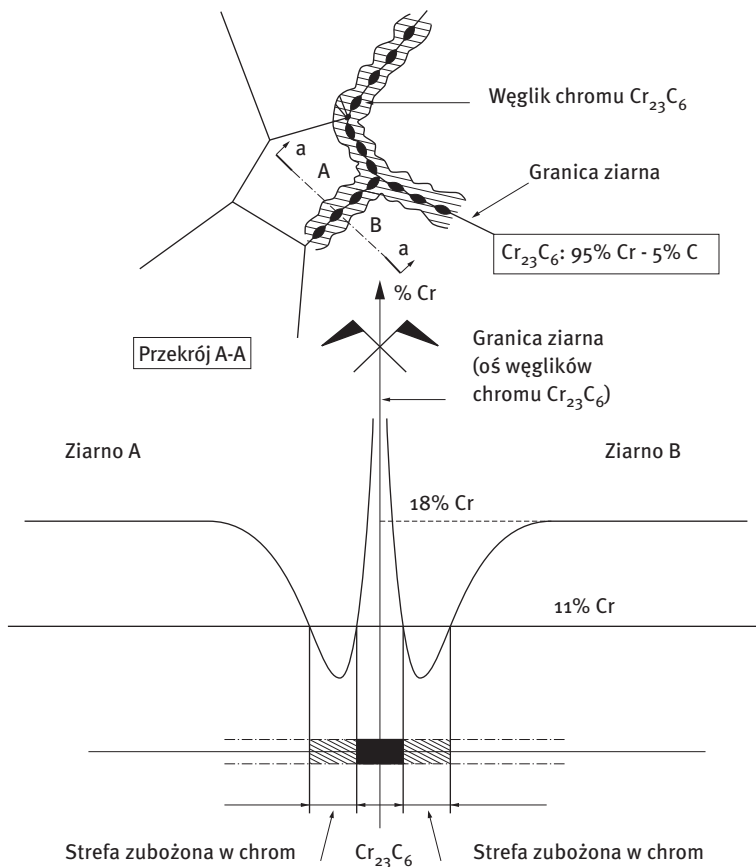


- c) niwelowanie naprężeń wewnętrznych przez wyżarzanie odprężające elementów przed wprowadzeniem ich do eksploatacji oraz ograniczenie naprężeń podczas eksploatacji (szczególnie tych powodowanych wibracjami, rozszerzalnością cieplną, itp.).

Korozja międzykrystaliczna

Niektóre materiały w wyniku nagrzania do temperatury pomiędzy 500 °C a 800 °C stają się „uczulone” na korozję międzykrystaliczną, która przebiega wzdłuż granic ziaren w materiale wystawionym na oddziaływanie środowiska korozyjnego. Zjawisko to występuje często podczas spawania, w obszarze strefy wpływu ciepła (rys. 1.1.6), gdzie materiał został nagrzany do podanego zakresu temperatury. Istnieją liczne metody zapobiegania korozji międzykrystalicznej w tym:

- a) dla stali austenitycznych (Fe-Cr-Ni lub Fe-Cr-Ni-Mo) – wybór gatunku stali z niskim stężeniem węgla ($C < 0,03\%$) lub dodatkiem pierwiastków „stabilizujących”, takich jak tytan;
- b) dla stali ferrytycznych (Fe-Cr lub Fe-Cr-Mo) – konieczny jest wybór gatunku „stabilizowanego” tytanem lub niobem;
- c) jeżeli stal nierdzewna uległa sensybilizacji, jej struktura może zostać przywrócona do stanu wyjściowego przez wyżarzanie z kolejnym szybkim chłodzeniem we właściwej temperaturze. Dla stali ferrytycznych 700-800 °C dla stali austenitycznych 1050 °C.



Rys. 1.1.6 – Schematyczne przedstawienie zjawiska wrażliwości na korozję międzykrystaliczną w wyniku zubożenia w chrom granic ziaren w stali nierdzewnej X5CrNi18-10 / 1.4301.

Korozja wysokotemperaturowa

Brak jest jednoznacznej definicji terminu „wysoka temperatura”, lecz dla typowych zastosowań stali nierdzewnych, za dolny próg zwykle uznawana jest temperatura około 500 °C. W tym zakresie, mechanizmy korozji są zdecydowanie odmienne i zależą od utleniającego charakteru atmosfery. Wysoko „utleniające” atmosfery gazowe obejmują powietrze, tlen, parę wodną, siarkę i jej tlenki (SO₂ i SO₃), dwutlenek węgla (CO₂), tlenki azo-

tu (NO_x) oraz chlor. Do gazów „redukcujących” zalicza się gazy zawierające wodór, siarkowodór (H₂S), tlenek węgla (CO), węglowodory, amoniak, itp. Stopione sole mogą mieć charakter zarówno redukcyjny jak i utleniający w stosunku do stali nierdzewnych. Ponadto niektóre stopione metale mogą powodować korozję stali nierdzewnych w wyniku zjawiska odwrotnego do stopowania stali.

Atmosfery „utleniające”

Jeżeli stale nierdzewne będą nagrzewane w środowisku atmosfery utleniającej to zawarty w nich chrom doprowadzi do utworzenia warstwy ochronnej zgorzeliny złożonej głównie z tlenku chromu Cr₂O₃, czasem pokrytej także warstwą spinelu takiego jak FeCr₂O₄.

Różnica rozszerzalności cieplnej między tlenkiem i metalem podłoża ma znaczący wpływ na stabilność warstwy zgorzeliny, zwłaszcza wtedy, gdy podczas eksploatacji występują cykliczne zmiany temperatury. W takich warunkach stale ferrytyczne (Fe-Cr)

wykazują lepsze własności w porównaniu do stali austenitycznych (Fe-Cr-Ni). Jest to związane ze współczynnikiem rozszerzalności cieplnej austenitu, który jest około 1,6 razy większy niż współczynnik ferrytu. W tablicy 1.1.3 przedstawiono zalecane wartości maksymalnej temperatury eksploatacji w atmosferze utleniającej.

Gatunek PN-EN 10088-2 Oznaczenia znormalizowane	Maksymalna temperatura eksploatacji (°C)	
	Praca ciągła	Praca przerywana
Gatunki austenityczne		
X5CrNi18-10 / 1.4301	930	870
X8CrNi25-21 / 1.4845	1150	1030
Gatunki ferrytyczne		
X6Cr17 / 1.4016	820	870
X2CrMoTi29-4 / 1.4592	1090	1170

Tablica 1.1.3 - Zalecane wartości maksymalnej temperatury eksploatacji w atmosferze utleniającej dla ferrytycznych i austenitycznych stali nierdzewnych.

Dodatek, co najmniej 2% aluminium, a o ile jest to możliwe nawet 5 lub 6%, wraz z niewielkim dodatkiem ceru, lantanu lub itru powoduje powstanie bogatej w aluminium ochronnej warstwy zgorzeliny o znacznej adhezji do podłoża. Przykładem mogą być stopy ferrytyczne zawierające około 20%Cr, dodatek aluminium oraz metali ziem rzadkich, które są stosowane na elementy katalizatorów spalin w systemach wydechowych samocho-

dów osobowych. W takim zastosowaniu, podczas pracy silnika z najwyższą prędkością, temperatura może osiągnąć prawie 1000 °C, a powstające gazy zawierające tlenki azotu (NO_x), węglowodory (HC), lotne związki organiczne (VOC) i tlenek węgla (CO), są przetwarzane w reakcji katalitycznej w „niezanieczyszczające” związki, takie, jak CO_2 , H_2O , N_2 oraz O_2 .

Atmosfery „redukujące”

Do najbardziej rozpowszechnionych typów atmosfer redukujących należą atmosfery bogate w tlenek węgla lub węglowodory, które mogą spowodować nawęglenie stali. Chrom, nikiel oraz krzem to pierwiastki stopowe skutecznie podwyższające odporność na ten typ zjawiska, a ich łączne oddziaływanie określa się zależnością: $\% \text{Ni} + 9 \times \% \text{Si}$. Typową formą nawęglenia w niskiej temperaturze jest zjawisko znane jako „pylenie metali”, w którym metal przy powierzchni rozpada się na drobne cząstki w związku z nadmierną absorpcją węgla pochodzącego z atmosfery redukującej.

Azotowanie może występować w wysokich temperaturach i związane jest z reakcją azotu atomowego wytworzonego przez rozkład termiczny amoniaku w kontakcie z powierzchnią metalu. Ponieważ azot wykazuje silne powinowactwo do tytanu, aluminium oraz chromu, to preferencyjnie będzie tworzył azotki w stali. W celu wytworzenia warstwy ochronnej zgorzeliny, która skutecznie ograniczy naazotowanie, wymagane jest stężenie niklu wyższe od 35%. Zaobserwowano jednak, że gatunek 21%Cr-11%Ni, zawierający cer, wykazuje

dobrą odporność w atmosferze krakowanego amoniaku, aż do temperatury 1100 °C.

W atmosferach zawierających siarkowodor, w temperaturze powyżej 800 °C, nikiel wpływa szkodliwie tworząc niskotopliwą eutektykę Ni/ Ni_3S_2 . Najlepsze własności w tych warunkach wykazują stale ferrytyczne.

W atmosferach zawierających wodór, decydującą rolę w wystąpieniu absorpcji wodoru odgrywa ciśnienie. Przy ciśnieniu rzędu 300 bar i temperaturze powyżej 600 °C stosuje się głównie stale martenzytyczne 12%Cr.

1.2 Grupy stali nierdzewnych

Główne grupy stali nierdzewnych

Przedstawiona poniżej tablica charakteryzuje główne grupy dostępnych na rynku stali nierdzewnych, tzn. tych produkowanych w dużych ilościach, które spełniają ponad 90% zapotrzebowania rynku. Wysoko wydajny cykl produkcyjny stali zwykle składa się z topienia w elektrycznym piecu łukowym, ra-

finacji w argonowo – tlenowym konwertorze (A.O.D), walcowania na gorąco w walcach lub walcierce Steckela, wstępnego wyżarzania, trawienia, walcowania na zimno na walcierce typu Sendzimira, ciągłego wyżarzania końcowego i obróbce wykańczającej.

<ul style="list-style-type: none"> • Gatunki martenzytyczne 	
<ul style="list-style-type: none"> – węgiel $\geq 0,1\%$ – od 12 do 18% chromu 	Stale nierdzewne podlegające przemianie austenitu w martenzyt podczas hartowania. W zależności od składu chemicznego oraz obróbki cieplnej mogą uzyskiwać twardość w zakresie od 40 do 60 HRC.
<ul style="list-style-type: none"> • Gatunki ferrytyczne 	
<ul style="list-style-type: none"> – od 0,02 do 0,06% węgla – od 0 do 4% molibdenu – od 11 do 29% chromu 	Granica plastyczności (R_p) tych gatunków stali zawiera się w zakresie 250-380 N/mm ² , a ich wytrzymałość na rozciąganie (R_m) od 410 do 700 N/mm ² przy wydłużeniu rzędu 20-32%. Generalnie nie mogą być utwardzane na drodze obróbki cieplnej.
<ul style="list-style-type: none"> • Gatunki austenityczne 	
<ul style="list-style-type: none"> – od 0,015 do 0,10% węgla – od 0 do 4% molibdenu – od 7 do 25% niklu – 17 do 20% chromu 	Granica plastyczności zwykle mieści się w zakresie od 215 do 360 N/mm ² , wytrzymałość na rozciąganie od 600 do 800 N/mm ² , przy wydłużeniu od 40 do 55%. Wysoka plastyczność tych stali sprawia, że charakteryzują się dużą podatnością na kształtowanie.
<ul style="list-style-type: none"> • Żaroodporne gatunki stali austenitycznych 	
<ul style="list-style-type: none"> – węgiel $\leq 0,2\%$ – 11 do 22% niklu – od 19 do 26% chromu 	Własności mechaniczne tych stali są podobne do własności typowych stali austenitycznych. Jednak z powodu wysokiego stężenia węgla zachowują dobrą wytrzymałość w podwyższonej temperaturze.
<ul style="list-style-type: none"> • Gatunki austenityczno-ferrytyczne typu duplex 	
<ul style="list-style-type: none"> – 0,02% węgla – 3% molibdenu – 22% chromu – 5,5% niklu 	Typowy skład chemiczny Gatunki te charakteryzują się bardzo wysoką granicą plastyczności $R_{p0,2}$ (> 620 N/mm ²) i wytrzymałością na rozciąganie $R_m > 800$ N/mm ² , przy wydłużeniu powyżej 40%.

Tablica 1.2.1 - Główne grupy stali nierdzewnych

Własności mechaniczne wybranych stali nierdzewnych dostępnych na rynku wraz z ich znormalizowanymi oznaczeniami przedstawiono w Tabelicy 1.2.2.

Tablica 1.2.2 –
Własności mechaniczne
wybranych stali
nierdzewnych w stanie
wyżarzonym.

Oznaczenie europejskie (EN 10088-2)		AISI (1) lub oznaczenie handlowe	Średnie własności mechaniczne		
Nazwa	Numer		R_m (2)	$R_{p0,2}$ (3)	A (%) (4)
Martenzytyczne stale nierdzewne					
X20Cr13	1.4021		550	340	24
X30Cr13	1.4028	420	600	340	24
X46Cr13	1.4034		650	400	23
Ferrytyczne stale nierdzewne					
X6Cr13	1.4000	410S	480	330	26
X2CrTi12	1.4512	409	410	250	32
X2CrNi12	1.4003		510	370	27
X8Cr17	1.4016	430	500	340	26
X3CrTi17	1.4510	430Ti	450	300	30
X2CrMoTi18-2	1.4521	444	540	380	27
Austenityczne stale nierdzewne					
X10CrNi18-8	1.4310	301	740	320	50
X5CrNi18-10	1.4301	304	630	300	52
X2CrNi18-9	1.4307	304L	620	310	50
X2CrNi19-11	1.4306	304L	600	300	50
X6CrNiTi18-10	1.4541	321	610	280	48
X4CrNi18-12	1.4303	305	580	250	52
Austenityczne stale nierdzewne zawierające molibden					
X5CrNiMo17-12-2	1.4401	316	620	340	48
X2CrNiMo17-12-2	1.4404	316L	610	310	45
X6CrNiMo17-12-2	1.4571	316Ti	610	310	47
X1NiCrMoCu25-20-5	1.4539	904L	650	340	40
Austenityczno-ferrytyczne stale nierdzewne typu duplex					
X2CrNiMo22-5-3	1.4462		840	620	30
Żaroodporne austenityczne stale nierdzewne (EN 10095)					
X15CrNiSi20-12	1.4828		620	310	50
X12CrNi23-13	1.4833	309S	630	330	45
X8CrNi25-21	1.4845	310S	600	300	42

(1) AISI: Amerykański Instytut Żelaza i Stali

(2) R_m : Wytrzymałość na rozciąganie (N/mm²).

(3) $R_{p0,2}$: Umowna granica plastyczności przy wydłużeniu trwałym 0,2% (N/mm²).

(4) A(%): Wydłużenie dla próbek o długości pomiarowej 80 mm (%).

Główne zastosowania

Poniżej przedstawiono przegląd najważniejszych zastosowań różnych gatunków stali nierdzewnych.

Austenityczne stale nierdzewne (0,015-0,1%C, 17-20%Cr, 7-25%Ni, 0-4%Mo)

Stale tej grupy głównie znajdują zastosowanie w przechowywaniu i obróbce artykułów spożywczych, transporcie żywności oraz wyposażeniu szpitalnym. Stanowią rów-

nież standardowe materiały stosowane na elementy w przemyśle chemicznym oraz są szeroko stosowane na przybory i urządzenia domowe.

Ferrytyczne stale nierdzewne (0,02-0,06%C, 11-29%Cr)

Stale o 11% stężeniu Cr są stosowane w samochodowych układach wydechowych, gdzie występuje umiarkowanie agresywna atmosfera. Głównym zastosowaniem gatunków z 17% stężeniem Cr jest produkcja narzędzi i

sprzętów domowych. Stopy z 29% Cr wykazują wysoką odporność korozyjną i są najczęściej stosowane na elementy pracujące w środowisku wody morskiej.

Austenityczno-ferrytyczne stale nierdzewne typu duplex

Najpowszechniej stosowanym gatunkiem stali typu duplex jest stop o 0,02% C – 22% Cr – 5,5% Ni – 3% Mo, którego znormalizowane oznaczenie europejskie to X2CrNiMo22-5-3 /

1.4462. Gatunek ten jest głównie stosowany na urządzenia dla przemysłu papierniczego, chemicznego i stoczniowego.

Martenzytyczne stale nierdzewne (C > 0,1%C, 12-14% Cr)

Jak większość stali węglowych, stosuje się je w stanie po hartowaniu i odpuszczaniu, co zapewnia końcowym produktom odpowiednią twardość dostosowaną do danego zastosowania. W zależności od rozpatrywanego

gatunku, martenzytyczne stale nierdzewne stosuje się do wytwarzania sztućców, noży i instrumentarium chirurgicznego.

1.3 Dobór gatunku stali nierdzewnej

Kryteria doboru stali nierdzewnych

Wybór gatunku stali nierdzewnej zwykle opiera się na podstawie kilku kryteriów, uwzględniających wymogi funkcjonalne, związane z wytwarzaniem i przeróbką oraz opłacalnością dla konkretnego zastosowania. Wyróżnić można następujące kryteria doboru stali nierdzewnych:

- *Odporność na korozję i ogólna trwałość:*
Stale nierdzewne posiadają bardzo dobrą odporność korozyjną w różnych ośrodkach korozyjnych.
- *Wysokie własności mechaniczne w wysokiej temperaturze oraz znaczna wytrzymałość i plastyczność w niskich temperaturach:*
Stale nierdzewne charakteryzują się wysoką wytrzymałością, plastycznością oraz odpornością na korozję w szerokim zakresie temperatur, od kriogenicznych do ponad 1000 °C.
- *Atrakcyjny wygląd zewnętrzny:*
Stal nierdzewna jest nowoczesnym materiałem, którego atrakcyjny wygląd jest jedną z podstawowych cech charakterystycznych.
- *Łatwość wdrażania:*
Stale nierdzewne łatwo poddają się kształtowaniu (tłoczenie, formowanie kształtów przez obróbkę plastyczną, itp.) oraz łączeniu (spawanie, klejenie, itp.).
- *Stale nierdzewne nie zmieniają smaku żywności:*

Jest to bardzo ważna własność dla zastosowań w rolnictwie, przemyśle spożywczym i produkcji napojów.

- *Stale nierdzewne są łatwe w czyszczeniu, dezynfekcji i sterylizacji:*
Posiadają wysoką odporność na odczynniki stosowane do tych celów (np. na parę wodną pod wysokim ciśnieniem stosowaną do sterylizacji).
- *Niskie koszty całkowite (użytkowania lub cyklu życia produktu – eksploatacji):*
Jeżeli uwzględnimy całkowite koszty zakupu materiału oraz koszty jego eksploatacji to pod tym względem stal nierdzewna jest bardzo opłacalnym materiałem.
- *Podatność do ponownego przetworzenia:*
Stal nierdzewna może być w 100% ponownie przetworzona i z powodzeniem jest stosowana do produkcji materiału na tym samym poziomie jakości, co materiał wejściowy.

Kombinacja wymienionych cech doprowadziła do powszechnego stosowania stali nierdzewnych w rolnictwie, przemyśle spożywczym i produkcji napojów, uwzględniając następujące przeznaczenia:
 - soki owocowe, piwo (przetwarzanie i dystrybucja), czekolada, pomidory (zbiory i przetwórstwo), ryby (przygotowanie i przetwórstwo), ser (od dojzenia po końcową obróbkę), wino (zbiory winogron, produkcja i przechowywanie wina).

Stale nierdzewne są również szeroko stosowane w przemyśle transportowym (wagony kolejowe, cysterny, kontenery chłodnicze, korpusy autobusów, itp.), w przemyśle chemicznym i petrochemicznym, w przemyśle naftowym, elektronice (paramagnetyczne komponenty dział elektronowych, elementy mocowań szkło-metal) oraz w przemyśle budowlanym (ściany osłonowe, klatki wind, schody ruchome, dachy, kanały kominowe, elementy wyposażenia miejskiego, itp.). Wymienione zastosowania są jedynie częścią bardzo szerokiego obszaru zastosowań tego materiału. Stale nierdzewne

są także powszechnie stosowane do produkcji przedmiotów codziennego użytku, a dobrym przykładem na to jest produkcja monet.

Bazując na wymienionych kryteriach, stworzono wykaz wybranych zastosowań wraz z odpowiadającymi gatunkami stali oraz sklasyfikowano je zgodnie z pięcioma głównymi grupami stali nierdzewnych (Rozdział 2 i Załącznik I).

W jakich przypadkach należy zastosować stal nierdzewną (zgodnie z pięcioma głównymi grupami)

Austenityczne stale nierdzewne (0,015- 0,1%C, 17-20%Cr, 7-25%Ni, 0-4%Mo)

- *Zbiorniki do przechowywania mleka*
 - X₅CrNi18-10 / 1.4301
- *Zbiorniki do przechowywania białego wina*
 - X₂CrNiMo17-12-2 / 1.4404
- *Beczki na piwo*
 - X₅CrNi18-10 / 1.4301
- *Wyposażenie dla zaopatrzenia w żywność, szpitali, przechowywania artykułów spożywczych, itd.*
 - X₅CrNi18-10 / 1.4301
 - X₂CrNiMo17-12-2 / 1.4401
 - X₂CrNi18-9 / 1.4307
- *Misy zlewów i kompletne zestawy zlewozmywaków*
 - X₅CrNi18-10 / 1.4301
- *Elementy zmywarek do naczyń oraz ościeżnice drzwiowe*
 - X₅CrNi18-10 / 1.4301
- *Przybory kuchenne*
 - X₅CrNi18-10 / 1.4301
- *Sztućce oraz miski*
 - X₅CrNi18-10 / 1.4301
- *Korpusy autobusów i wagonów*
 - X₅CrNi18-10 / 1.4301
- *Kanały kominowe*
 - X₅CrNi18-10 / 1.4301
 - X₂CrNiMo17-12-2 / 1.4404
 - X₁NiCrMoCu25-20-5 / 1.4539
w zależności od technologii (sztywne, elastyczne, o pojedynczej lub podwójnej ściance, wraz z lub bez kondensacji, rodzaju paliwa, itd.).
- *Zbiorniki gorącej wody*
 - X₂CrNiMo17-12-2 / 1.4404
 - X₆CrNiMoTi17-12-2 / 1.4571

Ferrytyczne stale nierdzewne (0,02 – 0,06%C, 11 – 29%Cr)

- *Urządzenia gospodarstwa domowego: pralki i suszarki, elementy zmywarek do naczyń*
 - X6Cr17 / 1.4016
- *Misy zlewów i suszarki*
 - X6Cr17 / 1.4016
 - X3CrTi17 / 1.4510
- *Sztućce, miski, pokrywki*
 - X6Cr17 / 1.4016
- *Samochodowe opaski zaciskowe przewodów*
 - X6Cr17 / 1.4016
- *Dekoracyjne elementy samochodowe*
 - X6Cr17 / 1.4016
 - X6CrMo17-1 / 1.4113
 - X6CrMoNb17-1 / 1.4526
- *Elementy zmywarek do naczyń*
 - X3CrTi17 / 1.4510
- *Zbiorniki gorącej wody*
 - X2CrTi17 / 1.4520
 - X2CrMoTi18-2 / 1.4521
- *Samochodowe układy wydechowe*
 - X2CrTi12 / 1.4512
 - X2CrTiNb18 / 1.4509
- *Rurki przegrzewaczy pary (elektrownie)*
 - X3CrTi17 / 1.4510
- *Rury w parownikach i przegrzewaczach wtórnych oraz kotły dla rafinerii cukru*
 - X3CrTi17 / 1.4510
- *Kanały kominowe*
 - X2CrMoTi18-2 / 1.4521
 - X2CrMoTi29-4 / 1.4592
- *Przewody rurowe w instalacjach odsalania wody morskiej*
 - X2CrMoTi29-4 / 1.4592
- *Łańcuchy w taśmach przenośników*
 - X6CrNi17-1 / 1.4017
- *Elementy konstrukcyjne, ramy kontenerów, wagony, kosze samowyładowcze, korpusy autobusów i wagonów*
 - X2CrNi12 / 1.4003
- *Stop monetarny*
 - X6Cr17 / 1.4016 o niskim stężeniu węgla

Austenityczno-ferrytyczne stale nierdzewne typu duplex

Najpowszechniej stosowanym gatunkiem stali typu duplex jest stal o 0,02%C – 22%Cr – 5,5%Ni – 3%Mo, którego znormalizowane oznaczenie europejskie to X2CrNiMo22-5-3. Do jego głównych zastosowań należą:

- *Przemysł chemiczny*
 - wymienniki ciepła w zakładach produkcji PVC
 - wyposażenie do składowania kwasów organicznych
 - zbiorniki i przewody rurowe
- *Produkcja papieru*
 - zbiorniki ciśnieniowe
 - pre-impregnatory,
 - kotły
 - warkni do masy celulozowo siarczanej
- *Przemysł stoczniowy*
 - spiralne przewody parowe
 - ściany przeciwpożarowe
- *Różne*
 - Płyty odpylaczy elektrostatycznych

Martensytyczne stale nierdzewne**(C > 0,1%, 12 – 14%Cr)**

Jak większość stali węglowych, stosuje się je w stanie po hartowaniu i odpuszczaniu, co zapewnia końcowym produktom odpowiednią twardość dostosowaną do danego zastosowania. W zależności od rozpatrywanego gatunku, martensytyczne stale nierdzewne głównie stosuje się na:

- *Ostrza noży*
 - X20Cr13 / 1.4021
 - X30Cr13 / 1.4028
 - X46Cr13 / 1.4034
- *Ostrza nożyc dla przemysłu papierniczego*
 - X30Cr13 / 1.4028
- *Membrany sprężarek, sprężyny*
 - X20Cr13 / 1.4021
- *Instrumenty chirurgiczne*
 - X30Cr13 / 1.4028
 - X46Cr13 / 1.4034

Żaroodporne austenityczne stale nierdzewne

- *Elementy pieców, wymienniki ciepła*
 - X12CrNi23-13 / 1.4833
 - X8CrNi25-21 / 1.4845
- *Palniki*
 - X12CrNi23-13 / 1.4833
- *Zamknięcia pieców*
 - X15CrNiSi20-12 / 1.4828
- *Samochodowe kolektory wydechowe spalin*
 - X15CrNiSi20-12 / 1.4828

1.4 Obróbka cieplna

Martensytyczne stale nierdzewne

Martensytyczne stale nierdzewne zwykle zawierają od 11,5% do 18% chromu oraz od 0,15 do 1,2% węgla. Najczęstszym zastosowaniem tych stali jest produkcja sztućców. Struktura stali martenzytycznych w stanie zahartowanym składa się z równomiernie rozproszonych węglików w osnowie ferrytu. W takim stanie obróbki cieplnej dostarcza się cienkie blachy. W przypadku omawianego zastosowania obróbka cieplna składa się z hartowania i odpuszczania, co zapewnia uzyskanie struktury całkowicie martenzytycznej bez udziału węglików chromu.

W celu otrzymania struktury całkowicie martenzytycznej, stal podgrzewana jest do temperatury występowania jednofazowej struktury austenitycznej, powyżej linii przemiany A_{c_3} , zwykle ok. 900 °C, w zależności od stężenia węgla i chromu. Dla stopów o stężeniu chromu między 11,5% a 13,5% oraz zawartości węgla niższej niż 0,15%, linia A_{c_3} znajduje się w temperaturze ok. 920 °C, a austenityzowanie wykonuje się w temperaturze między 950 a 1100 °C. Dla zawartości węgla 0,15-0,5% i chromu od 12 do 16%, linia A_{c_3} położona jest między 850 a 900 °C, a austenityzowanie wykonuje się w zakresie temperatury 950-1100 °C. W przypadku gatunków zawierających od 0,6 do 1,2% C i 17-18% Cr, linia A_{c_3} znajduje się między 830 i 860 °C, a hartowanie wykonuje się z temperatury od 1000 do 1050 °C. Kolejną, czwartą już grupą martenzytycznych stali nierdzewnych są stale o stężeniu węgla niższym od 0,2% i 12-18% chromu oraz dodatkiem 1,5-5% Ni, dla których temperatura A_{c_3} znajduje się między 800 a 900 °C i które są austenityzowane w temperaturze między 950 a 1000 °C.

Czas utrzymywania w temperaturze austenityzowania zależy od grubości obrabianego cieplnie elementu, musi być on wystarczająco długi, aby umożliwić całkowite rozpuszczenie węglików chromu. Następujące po tym chłodzenie do temperatury otoczenia musi przebiegać w czasie nie dłuższym niż jedna minuta. Dla małych grubości przekrojów, wystarczające jest zwykle naturalne bądź wymuszone chłodzenie powietrzem, podczas gdy dla grubości większych od 5 mm konieczne jest hartowanie w oleju. Jeśli po chłodzeniu w strukturze wciąż obserwuje się węgliki chromu oznacza to, że temperatura austenityzowania była za niska lub czas wygrzewania był zbyt krótki. Nieprawidłowy dobór parametrów obróbki cieplnej powodujący zmniejszenie udziału węgla w martenzytynie związanej z węglami prowadzi do obniżenia twardości i odporności korozyjnej stali.

W gatunkach wysokowęglowych podczas chłodzenia z temperatury hartowania nie zachodzi całkowita przemiana austenitu w martenzyt, a obecność austenitu szczątkowego powoduje obniżenie twardości. Przemiana może być skutecznie ukończona za pomocą wymrażania w temperaturze -80 °C. Szok termiczny wywołany szybkim chłodzeniem powoduje wystąpienie naprężeń wewnętrznych, które mogą powodować wzrost kruchości. W celu zwiększenia plastyczności oraz twardości, stosuje się wyżarzanie odprężające, polegające na wygrzewaniu stali w temperaturze 150-300 °C przez kilka godzin. Bardzo istotne jest unikanie zakresu temperatury 400-600 °C, w którym może wystąpić wydzielanie węglików chromu i towarzyszące mu powstawanie obszarów zubożonych w chrom, co w efekcie powoduje wrażliwość na korozję międzykryształiczną.

Ferrytyczne stale nierdzewne

W ujęciu metalurgicznym, ferrytyczne stale nierdzewne znacznie różnią się między sobą. Niektóre pozostają ferrytyczne w całym zakresie temperatury, a tak zwane gatunki pół-ferrytyczne mogą zawierać do 30% austenitu w wysokiej temperaturze, przekształcającego się w martenzyt podczas chłodzenia. Ponadto w stopach niestabilizowanych, do których należą stale pół-ferrytyczne, wygrzewanie w 900-950 °C z następnym wolnym chłodzeniem może prowadzić do wydzielenia węglików chromu oraz zmniejszenia odporności na korozję międzykrystaliczną w wyniku zubożenia w chrom granic ziaren. Plastyczność oraz odporność na korozję tych stopów może być przywrócona na drodze obróbki cieplnej w 750-850 °C, w czasie zależnym od grubości produktu (zaleca się czas dwóch minut na każdy milimetr). Chłodzenie, szczególnie w pobliżu temperatury 475 °C musi być wystarczająco szybkie, aby uniknąć wzrostu kruchości. W temperaturze 400-500 °C osnowa ferrytu ulega rozsegregowaniu na dwie oddzielne fazy o sieci regularnej przestrzennie centrowanej z odpowiednio wysokim i niskim stężeniem chromu. Reakcja ta przebiega z maksymalną szybkością w 475 °C. Ferrytyczne stale nierdzewne o stężeniu 11%Cr są praktycznie niewrażliwe na to zjawisko. W stopach o zawartości 17%Cr zachodzi ono tylko w niewielkim zakresie, podczas gdy stale o stężeniu 25%Cr są na nie bardzo podatne.

Stale nierdzewne o stężeniu chromu powyżej 25% wykazują również skłonność do formowania bogatej w chrom kruchej fazy sigma w 500-800 °C. Może ona przejść do roztworu stałego w trakcie wygrzewania w 1000 °C przez pół godziny z kolejnym szybkim chłodzeniem do temperatury otoczenia.

Pół-ferrytyczne stopy o stężeniu 17%Cr charakteryzują się występowaniem obszaru dwufazowego austenit + ferryt w temp. 850-1100 °C. Jeżeli stop zostanie wygrzany w tym zakresie temperatury, to po ochłodzeniu do temperatury pokojowej w strukturze wystąpi martenzyt. Wzrost kruchości tych materiałów wywołany obecnością martenzytu ma mniejsze znaczenie niż ten wywołany przez węgliki chromu na granicach ziaren, które nie tylko pogarszają odporność korozyjną, ale również wpływają na wzrost podatności na pęknięcia międzykrystaliczne przy dużych naprężeniach. Wzrost kruchości stali pół-ferrytycznych (np. X6Cr17/1.4015) ze względu na wydzielenia węglików chromu, azotków lub węglikoazotków zachodzi po wygrzewaniu w temperaturze powyżej 900-950 °C. Temu zjawisku można przeciwdziałać przez właściwe dobranie składu chemicznego stopu. Z tego powodu stężenie pierwiastków międzywęzłowych - węgla oraz azotu nie może być wyższe niż 0,020% i musi być połączone z zastosowaniem dodatku tytanu, który tworzy azotki TiN w fazie ciekłej podczas krzepnięcia lub niobu - obydwa te pierwiastki w fazie stałej tworzą węglikoazotki.

Kolejną grupą stopów, zaliczanych do stali ferrytycznych, są materiały dwufazowe ferrytyczno-martenzytyczne, których struktura w wysokiej temperaturze składa się z austenitu w udziale do 50%, a w temperaturze otoczenia z ferrytu i około 10% martenzytu. Obróbka cieplna tych stali powinna być zaplanowana w sposób umożliwiający tworzenie się austenitu w ilości niezbędnej do powstania wymaganego udziału martenzytu po hartowaniu. W celu uniknięcia występowania austenitu szczątkowego, prędkość chłodzenia powinna być większa niż 20 °C/h.

Austenityczne stale nierdzewne

Przesycanie

Celem przesycania jest uzyskanie w pełni homogenicznej struktury austenitycznej w temperaturze otoczenia. W zależności od gatunku stali, przesycanie wykonuje się w tem-

peraturze 1000-1150 °C (czas wygrzewania wynosi od 1 do 3 minut na każdy milimetr grubości), wraz z przyśpieszonym chłodzeniem w powietrzu lub wodzie.

Obróbka eliminująca ferryt delta

W austenitycznych stalach nierdzewnych po obróbce cieplnej może pozostawać pewien udział wysokotemperaturowego ferrytu delta. Występowanie tej fazy zwykle nie pogarsza własności stali, może stać się ona krucha w wyniku wydzielenia się fazy sigma w tem-

peraturze 550-900 °C. Ferryt delta może być wyeliminowany przez wygrzewanie w temperaturze 1150 °C przez 36 godzin i następne przyśpieszone chłodzenie do temperatury otoczenia.

Wyżarzanie odprężające

Podczas wytwarzania elementów różne operacje obróbki mogą spowodować wystąpienie w materiale naprężeń wewnętrznych, które mają szkodliwy wpływ na trwałość wytwarzanych z nich urządzeń, między innymi z powodu występowania naprężeniowego pękania korozyjnego – korozji naprężeniowej. W celu wyeliminowania lub zmniejszenia tych naprężeń można zastosować jeden z dwóch rodzajów wyżarzania odprężającego:

długotrwałe wygrzewanie (od 10 do 20 minut na każdy milimetr grubości) w temperaturze 200-400 °C i powolne chłodzenie. Obróbka ta nie powoduje żadnych przemian fazowych.

dla gatunków stali niepodatnych na korozję międzykrystaliczną - krótkotrwałe wygrzewanie (około 3 minut na milimetr grubości), w temperaturze około 850 °C.

Austenityczno-ferrytyczne stale nierdzewne typu duplex

Przesycanie

Głównym celem przesycania austenityczno-ferrytycznych stali nierdzewnych jest uzyskanie struktury składającej się z 50% austenitu oraz 50% ferrytu w temperaturze pokojowej, bez obecności faz międzymetalicznych oraz innych wydzieleni. Ważne jest, aby unikać powstawania wydzieleni faz międzymetalicznych podczas chłodzenia, głównie z uwagi na skłonność ferrytu do wzrostu kruchości w temperaturze 475 °C. Czas wygrzewania w zakresie temperatury od 950 do 700 °C musi być

maksymalnie krótki, co ograniczy zagrożenie formowania się fazy sigma. W stalach zawierających molibden, zakres wzrostu kruchości rozszerzony jest do 1050 °C. Temperatura przesycania dla stopów niezawierających molibdenu wynosi około 1050 °C, a dla stali z molibdenem ok. 1100 °C. Z uwagi na to temperatura przesycania powinna mieścić się w zakresie 1000-1150 °C, zgodnie z wymaganym udziałem objętościowym austenitu i ferrytu.

Obróbka cieplna po spawaniu

Stale austenityczno-ferrytyczne typu duplex są odporne na korozję międzykrystaliczną i nie wymagają wykonywania obróbki cieplnej po spawaniu. Jednak spawanie, szczególnie w przypadku procesu jednoprzejściowego bez spoiwa, zakłóca proporcje występowania fazy austenitycznej i ferrytycznej w złączu

spawanym, w którym zwykle po spawaniu występuje powyżej 90% ferrytu. W celu przywrócenia równowagi między zawartością obu faz zaleca się wykonanie obróbki przesycania zgodnie z opisem podanym w części „przesycanie”.

1.5 Dostępne na rynku produkty ze stali nierdzewnej

Główny podział produktów ze stali dokonuje się na produkty płaskie (które stanowią 85% światowego zużycia stali nierdzewnych) oraz produkty długie (stanowiące około 15% światowego zużycia stali nierdzewnych) (Tablica 1.5.1 i 1.5.2)

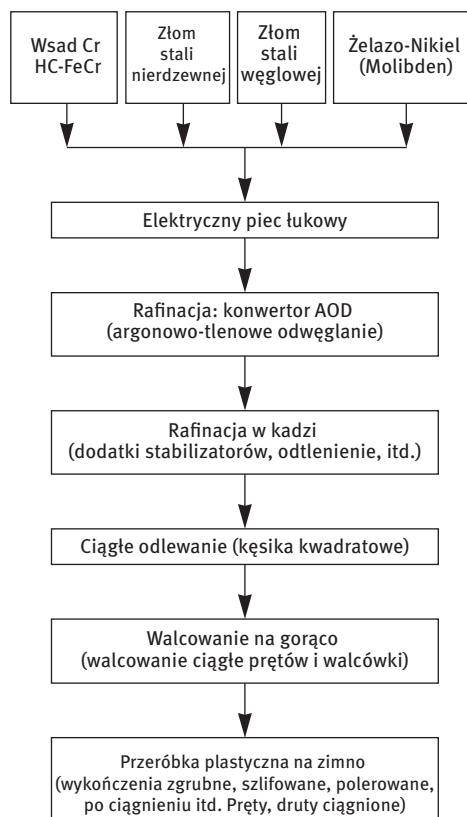


Zdjęcie 3. Linia wzdłużnego cięcia blach



Tablica 1.5.1 - Główne etapy w cyklu wytwarzania zwijanych w kręgi produktów płaskich ze stali nierdzewnych

Tablica 1.5.2 - Główne etapy w cyklu wytwarzania produktów długich ze stali nierdzewnych



Produkty płaskie

Produkty płaskie stanowią około 85% światowego zużycia stali nierdzewnych. Można je podzielić na:

- Taśmy w kręgach, które dzieli się na:
 - taśmy walcowane na gorąco o grubościach od 2,0 do 13,0 mm,
 - taśmy walcowane na zimno o grubościach od 0,3 do 8,0 wraz z super cienkimi taśmami aż do grubości 50 μm i szerokości do 1000 mm.

Najbardziej rozpowszechnioną szerokością taśmy jest 1250 mm. Dla niektórych grubości dostępne są taśmy o szerokości do 1500 mm i wyjątkowo także do 2000 mm.

- Blachy i płyty o grubości do 150 mm oraz szerokości do około 4000 mm.

Największy udział w tych produktach stanowią taśmy walcowane na zimno, które same zapewniają ponad 75% całkowitego zapotrzebowania na produkty płaskie.

Produkty te są stosowane zarówno w stanie wyżarzonym (stale ferrytyczne) jak i po przesycaniu z kolejnym szybkim chłodzeniem (stale austenityczne i stale typu duplex) lub w stanie przerobionym plastycznie na zimno, w celu uzyskania wyższej granicy plastyczności i odporności na rozciąganie. Gatunki stali ferrytycznych X6Cr17 / 1.4016 i X6CrMo17 / 1.4113-1 są często stosowane w stanie po obróbce plastycznej na zimno, ponadto są nawet bardziej powszechne od austenitycznych gatunków

X10CrNi18-8 / 1.4310, X5CrNi18-10 / 1.4301 i X2CrNi18-7 / 1.4318, których wytrzymałość może być znacznie podwyższona w wyniku kontrolowanego stopnia zgniotu.

Tablica 1.5.3 przedstawia własności mechaniczne popularnych gatunków stali ferrytycznych i austenitycznych w stanie obrabionym plastycznie na zimno.

Podczas obróbki plastycznej na zimno można uzyskać szeroki zakres wytrzymałości stali w wyniku kontrolowanego stopnia zgniotu. Klasa wytrzymałości C 850 odpowiada w przybliżeniu klasie „1/4 hard”, klasa C 1000 odpowiada „1/2 hard”, klasa C 1150 to „3/4 hard” i klasa C 1300 to „full hard”, co odpowiada maksymalnemu dopuszczalnemu stopniowi umocnienia.

Produkty płaskie mogą być dostarczane w różnym stanie wykończenia powierzchni:

- Wykończenie Nr 1, stan powierzchni taśmy po walcowaniu na gorąco, wyżarzaniu i trawieniu (stan 1D).
- Wykończenie nr 2, stan powierzchni taśmy po walcowaniu na zimno, wyżarzaniu i trawieniu (stan 2D).
- Wykończenie nr 2B, stan powierzchni tak jak w stanie 2D, z dodatkowym walcowaniem wykańczającym (wygładzającym) dla obniżenia chropowatości podwyższenia jasności powierzchni (stan 2B).

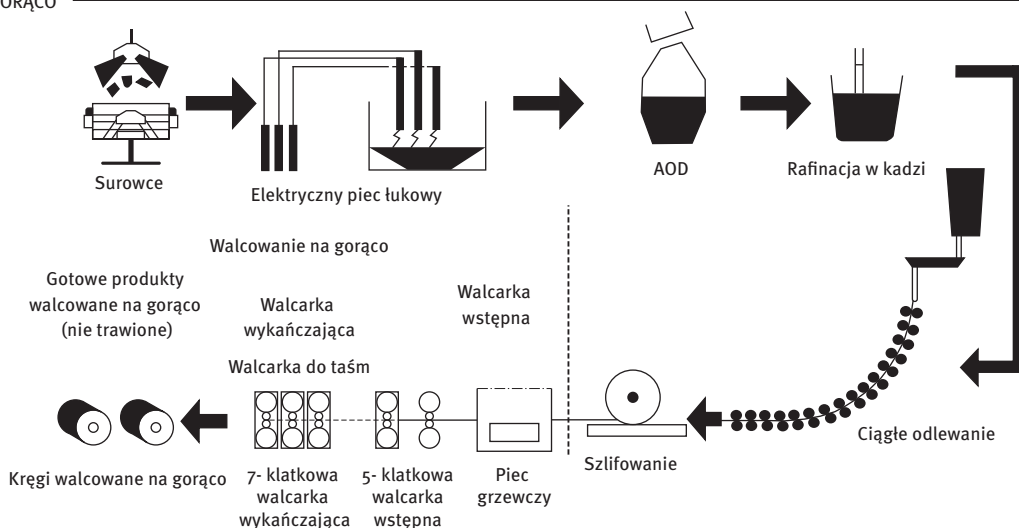
Oznaczenie znormalizowane EN 10088-2	Wytrzymałość na rozciąganie R_m (N/mm ²) (stopień zgniotu)				
	C700	C850	C1000	C1150	C1300
X6Cr17 / 1.4016	700/850	850/1000			
X6CrMo17-1 / 1.4113	700/850	850/1000			
X10CrNi18-8 / 1.4310		850/1000	1000/1150	1150/1300	1300/1500
X5CrNi18-10 / 1.4301		850/1000	1000/1150	1150/1300	1300/1500
X2CrNi18-7 / 1.4318		850/1000	1000/1150		

Tablica 1.5.3 - Wytrzymałość na rozciąganie (R_m) stali nierdzewnych w różnych stanach obróbki plastycznej na zimno.

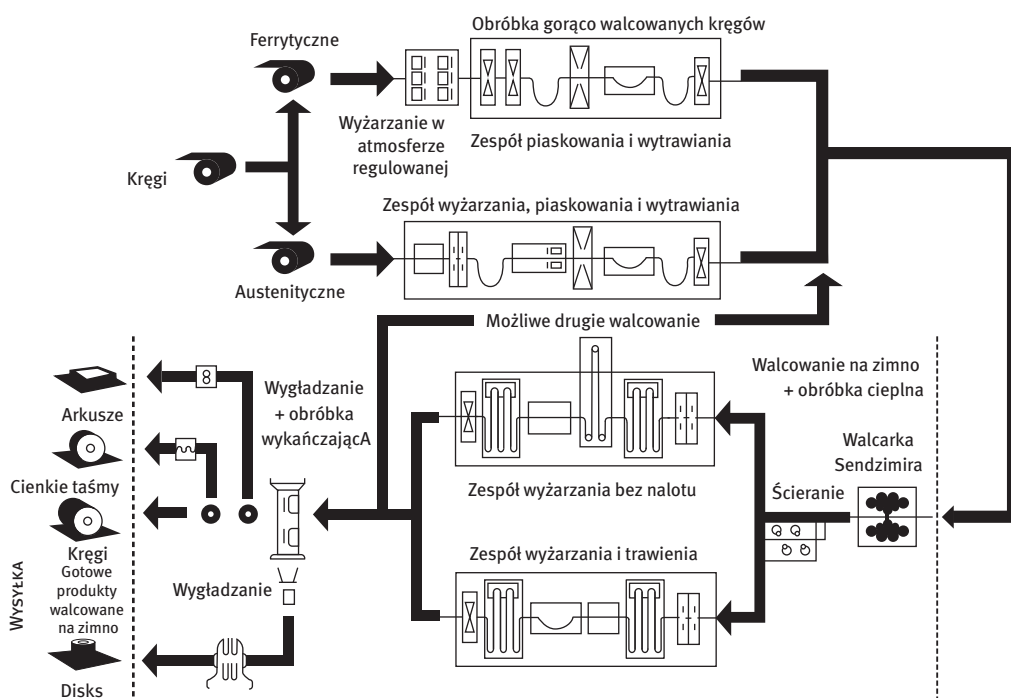
- Wykończenie po wyżarzeniu jasnym (wyżarzanie bez nalotu) uzyskuje się w wyniku wykonania końcowego wyżarzania w atmosferze ochronnej (mieszanina azot-wodór lub czysty wodór). W efekcie uzyskuje się gładką powierzchnię, której jasność jest dodatkowo zwiększana przez walcowanie wygładzające (stan 2R).

Oprócz wymienionych wykończeń powierzchni istnieje szereg innych rodzajów wykończeń, takich jak wykończenie szlifowane (stan 2G), szlifowane na matowo – szczotkowane (stan 2J) oraz z powierzchnią wzorzystą (efekt skóry, itd. – stan 2M) (rys. 1.5.1).

PRZERÓBKA PLASTYCZNA NA GORĄCO



PRZERÓBKA PLASTYCZNA NA ZIMNO



Rys. 1.5.1 - Etapy cyklu wytwarzania produktów płaskich ze stali nierdzewnych.

Produkty długie

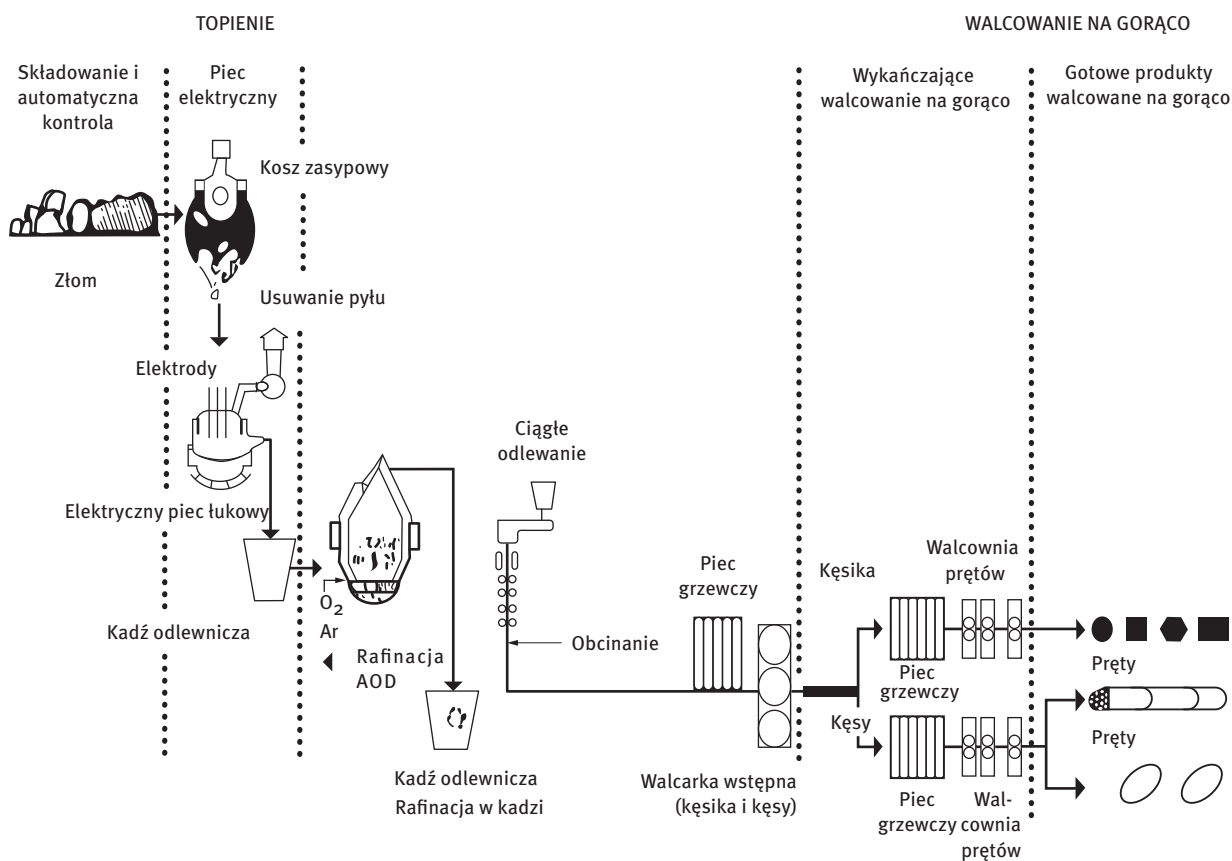
Produkty długie stanowią około 15% światowego zużycia stali nierdzewnych, są to głównie pręty, druty, kształtowniki o przekroju standardowym (okrągłe, kwadratowe, prostokątne) oraz specjalne (kątowniki, kształtowniki typu U, T oraz I). Produkty te mogą być dostarczane w stanie powierzchni po walcowaniu na gorąco, po różnych typach obróbki cieplnej i mechanicznej, takich jak usuwanie zgorzeli, usuwanie cienkiej warstwy wierzchniej materiału, itd., lub po przeróbce plastycznej na zimno (po ciągnięciu, obróbce mechanicznej, szlifowaniu, polerowaniu, itd.).

Najczęściej spotykane średnice prętów i walcówki mieszczą się w zakresie od 2 do

45 mm. Produkty o średnicy mniejszej od lub równej 10 mm mogą być poddawane tzw. polerowaniu dekoracyjnemu. Druty i walcówka o średnicach od 2 do 16 mm są często poddawane spęczaniu na zimno (elementy złączne). W budownictwie stosuje się powszechnie druty o średnicy od 2 do 5 mm do celów dekoracyjnych, podczas gdy drut o średnicy 2,4-2,7 mm stosuje się do wytwarzania haków dekarskich.

Na rysunku 1.5.2 przedstawiono etapy cyklu wytwarzania produktów długich ze stali nierdzewnych.

Rys. 1.5.2. Etapy cyklu wytwarzania produktów długich ze stali nierdzewnych



Rury

Największą grupę rur stanowią rury spawane ze szwem produkowane przez ciągłe spawanie taśmy. Stosuje się je głównie do transportu płynów, do celów dekoracyjnych oraz jako elementy konstrukcyjne.

Rury pracujące w środowisku korozyjnym są z reguły spawane w procesie ciągłego spawania metodą TIG (spawanie elektrodą wolframową w osłonie gazu obojętnego) lub procesach laserowych lub plazmowych dla większych grubości. Rury te mają zawsze przekrój okrągły.

Rury do zastosowań dekoracyjnych mogą mieć przekrój okrągły, kwadratowy lub prostokątny. Są one spawane przy zastosowaniu jednego z trzech wymienionych wcześniej pro-

cesów spawania lub przez zastosowanie technologii indukcyjnej wysokiej częstotliwości. Po spawaniu zwykle są polerowane.

Dostępny jest szeroki zakres znormalizowanych wymiarów rur, a do najczęściej stosowanych należą:

dla przekrojów okrągłych: średnica zewnętrzna od 10 do 168,3 mm, grubość 0,5-2,0 mm;

dla przekrojów kwadratowych: długość krawędzi bocznej od 12 do 80 mm, grubość 1,0-2,0 mm;

dla przekrojów prostokątnych: długość dłuższej krawędzi od 20 do 100 mm; długość krótszej krawędzi od 6 do 40 mm; grubość 1,0-2,0 mm.

2 Praca ze stalą nierdzewną

2.1 Cięcie – cięcie termiczne

Termin „cięcie” jest stosowany do określania różnych metod obróbki stosowanych do wykrawania arkuszy lub wykrojów do dalszej przeróbki lub łączenia (np. przez spawanie) i w efekcie uzyskania bardziej złożonego kształtu produktu końcowego. Cięcie może

być wykonywane zarówno mechanicznie, stosując metody: cięcia na nożycach, wykrawania, cięcia nożycami wibracyjnymi, cięcia piłą lub z zastosowaniem metod termicznych, przy użyciu łuku plazmowego lub wiązki lasera.



Zdjęcie 3: Hydrauliczne nożyce gilotynowe

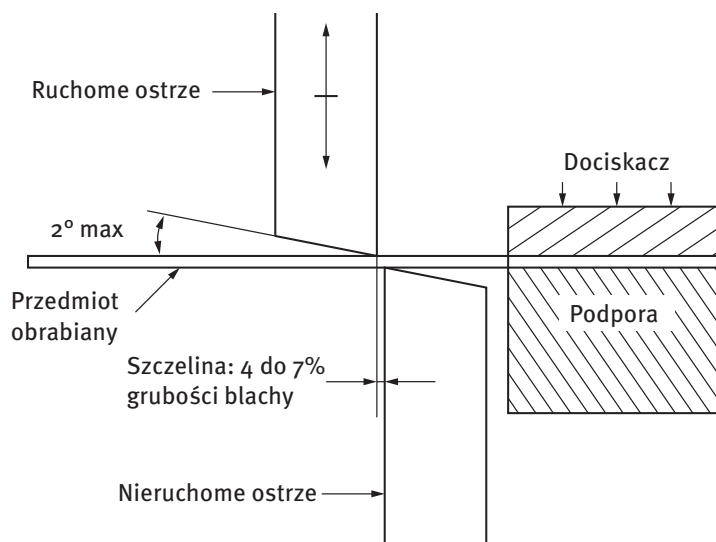
CIĘCIE NA NOŻYCACH

Cięcie ostrzem prostym

Cięcie ostrzem prostym najczęściej stosuje się do cięcia stali miękkich. W przypadku stali nierdzewnych, szczególnie stopów austenitycznych (Fe-Cr-Ni), cięcie wymaga większych sił nacisku co, powoduje że maksymalnie dopuszczalna grubość ciętego elementu stanowi około 70% grubości stali miękkiej. Przykładowo, siły zastosowane do cięcia ostrzem prostym arkusza stali miękkiej o grubości 5 mm, zostaną ograniczone do grubości 3,5 mm w przypadku stali nierdzewnych (rys. 2.1.1).

Szczelina między ostrzami powinna wynosić 4-7% grubości arkusza z tolerancją do

$\pm 0,01$ mm. Jeżeli cięcie ma być wykonane bardzo blisko końcowej krawędzi arkusza stali należy rygorystycznie stosować podaną zasadę. W przypadku cięcia na środku arkusza blachy można stosować większe tolerancje. Dla arkuszy o grubości 1,5 mm zaleca się szczelinę 0,07 mm. Dla grubości większych od 1,5 mm szczelina powinna wynosić ok. 0,1 mm. W czasie cięcia kąt natarcia pomiędzy płaszczyzną arkusza blachy a końcówką ostrza może mieścić się w zakresie od $0^{\circ}30'$ do 2° (zazwyczaj jest to $1^{\circ}30'$).



Rys. 2.1.1 - Mechanizm cięcia ostrzem prostym.

Zalecanym materiałem na ostrza nożyc jest ulepszana cieplnie stal narzędziowa lub chromowa stal stopowa. W celu zwiększenia trwałości, między operacjami cięcia, ostrza powinny być smarowane parafiną lub olejem o wysokiej lepkości.

We wszystkich operacjach wymagających kontaktu między narzędziem a stalą nierdzewną należy stosować ostrza wyłącznie przeznaczone do cięcia tego materiału, co uniemożliwi zanieczyszczenie powierzchni stali, szczególnie przez cząstki żelaza.

W przypadku cięcia blachy na cienkie taśmy, ich szerokość musi wynosić przynajmniej 30 razy wartość grubości blachy. Dla arkusza o grubości 1 mm, minimalnie dopuszczalna szerokość taśmy wynosi 30 mm.

Mając na względzie oprzyrządowanie do cięcia, powierzchnię blachy należy chronić

przed uszkodzeniem za pomocą dociskaczy (zarysowania, wgniecenie, itd.). Szczególnie w przypadku cienkich arkuszy blachy, zaciski szczęk powinny być pokryte elastomerem.

Po operacji cięcia, należy poddać kontroli cięte krawędzie. Jeżeli szczelina między ostrzami jest poprawna, to gładka powierzchnia części górnej przecięcia, odpowiadająca penetracji ostrza, powinna wynosić około 40% grubości elementu, a pozostała część krawędzi przecięcia powinna stanowić 60%.

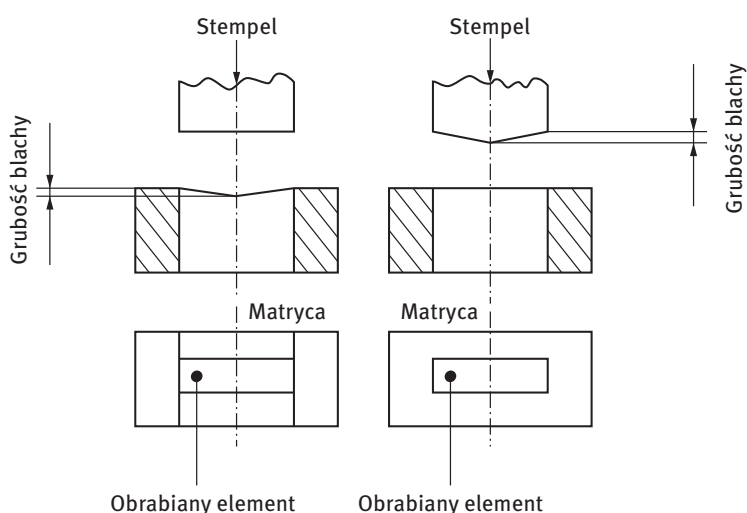
Przy zbyt małej szczelinie, strefa przełomu pokrywa całość obszaru krawędzi, a przy zbyt dużej, dochodzi do plastycznego płynięcia metalu między dwoma ostrzami, co prowadzi do powstawania zadziorów i nadmiernych lokalnych odkształceń materiału.

Cięcie wzdłużne

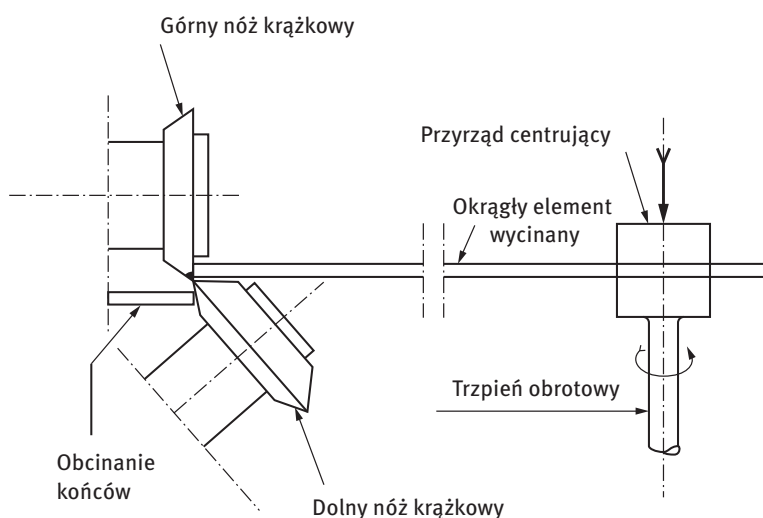
Cięcie wzdłużne polega na cięciu arkusza blachy na kilka wąskich taśm. Typowym zastosowaniem tego procesu jest produkcja taśm stosowanych do produkcji rur spawanych ze szwem (taśma jest formowana przez wielokrotne profilowanie na rolkach, a krawędzie są łączone szwem wzdłużnym). W celu uzyskania zadowalającej dokładności cięcia, szczelina cięcia i stopień pokrycia obrotowych ostrzy tnących muszą być odpowiednio wyregulowane. Austenityczne stale nierdzewne obrabiane plastycznie na zimno lub hartowane stale martenzytyczne wymagają małego współczynnika między stopniem

pokrycia noży a grubością taśmy. Wartość średnia szczeliny cięcia powinna wynosić 5% grubości taśmy. W zależności od rodzaju stali nierdzewnej oraz grubości taśmy, prędkość cięcia wzdłużnego waha się od 60 do 200 m/min. Ostrza tnące powinny być systematycznie ostrzone, co zapobiegnie powstaniu zadziorów na ciętych krawędziach taśmy. Dla zwiększenia trwałości ostrzy zaleca się ich smarowanie rozpuszczalnym olejem lub smarami na bazie parafiny. Materiał zalecany na ostrza tnące jest taki sam jak w przypadku cięcia na nożycach ostrzem prostym.

Rys. 2.1.2 - Przebijanie otworów na prasach z kwadratowego elementu



Rys. 2.1.3 - Cięcie nożycami krążkowymi.



Wykrawanie

Przebijanie otworów na prasach

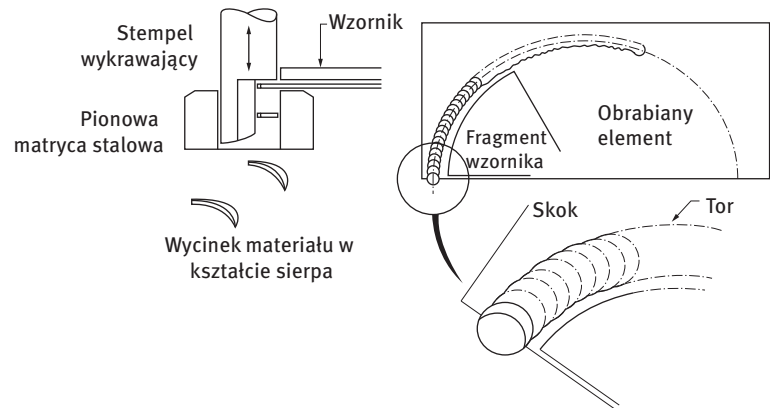
Wykrawanie kształtów ze stali nierdzewnej wymaga zastosowania prasy o większej mocy niż w przypadku stali miękkiej. Aby ułatwić wykrawanie otworów, zarówno stempel wykrawający, jak i matryca powinny posiadać ukosowanie, co w osiowej długości między środkiem a krawędzią w przybliżeniu zapewni powstanie różnicy, równej grubości arkusza. Szczelina między stemplem wykrawającym a arkuszem blachy powinna zawierać się w granicach 5 do 10% grubości obrabianego przedmiotu (rys. 2.1.2).

Cięcie nożycami krążkowymi

Podobnie jak w przypadku cięcia wzdłużnego, nożyce krążkowe muszą zachodzić na siebie. Proces ten jest stosowany głównie do wycinania krążków o dużej średnicy, przeznaczonych do produkcji den zbiorników lub dalszej obróbki na prasach wielkoformatowych. Maksymalna średnica elementów obrabianych wynosi 2 m dla grubości 4 mm. Najczęściej stosuje się taką samą szczelinę cięcia jak w przypadku cięcia wzdłużnego. Podczas produkcji elementów okrągłych, krawędzie tnące są prowadzone przez przyrząd centrujący umiejscowiony w środku wycinanego materiału. Odcisk na wycinanym materiale wytworzony przez zaciski systemu centrującego musi być po obróbce usunięty (np. przez szlifowanie). W celu uniknięcia takich śladów należy stosować specjalne podkładki (rys. 2.1.3).

Cięcie nożycami wibracyjnymi

Cięcie nożycami wibracyjnymi to metoda cięcia mechanicznego, w której materiał jest usuwany po założonym torze cięcia, a kształt odcinanego fragmentu jest uzależniony od zastosowanego oprzyrządowania. Stempel wykrawający porusza się w górę i w dół z ustaloną prędkością, odrzucając w każdym skoku odcięty fragment materiału w kształcie sierpa. Cięcie nożycami wibracyjnymi jest powtarzającym się procesem wykrawania otworów, w którym skok między kolejnymi cięciami jest dostosowany do grubości obrabianego arkusza blachy. Ścieżka cięcia jest wyznaczana przy użyciu wzornika lub elektronicznego sy-



Rys. 2.1.4 - Cięcie nożycami wibracyjnymi.

stemu sterowania. Uszkodzenia powierzchni powstające po kolejnych ruchach stempła wykrawającego można usunąć z gotowych wyrobów przez szlifowanie (rys. 2.1.4).

Dziurkowanie i perforacja

Dziurkowanie i perforacja są powszechnymi metodami wykrawania otworów w blachach, gdzie min. średnica otworu powinna równać się dwukrotnej grubości blachy, a min. odległość między kolejnymi otworami powinna być równa połowie średnicy wybijanych otworów. Siła wymagana do dziurkowania jest znacznie wyższa od wartości stosowanych dla stali miękkich - rzędu wytrzymałości na rozciąganie danego gatunku stali nierdzewnej. Wymagana siła cięcia zależy także od efektywnej szczeliny między stemplem a matrycą, liczby jednocześnie wykrawanych otworów i szybkości procesu (rys. 2.1.5).

Szczelina C mierzona między stemplem a matrycą, wyraża się zależnością: $C=D-d$, gdzie: D , d – średnica odpowiednio matrycy i stempła. Dla normalnych warunków dziurkowania, szczelina $C=0,12t$, gdzie: t – grubość przedmiotu obrabianego. Przy dziurkowaniu precyzyjnym wymagana jest mniejsza szcze-

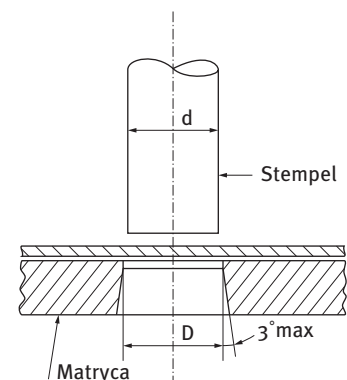
lina, co odpowiada $C=0,07t$. Otwory powstałe w wyniku dziurkowania wykazują zawsze pewien stopień stożkowatości, która rośnie wraz z grubością dziurkowanego arkusza blachy.

W celu ułatwienia cięcia oraz zapobiegania przywieraniu odciętych fragmentów materiału do obrabianych powierzchni stosuje się smary.

Użycie ręcznych dziurkownic jest ograniczone do grubości 2 mm materiału obrabianego i cechuje się niską wydajnością procesu.

Mechaniczne prasy dziurkujące często są wyposażone w dodatkowy cienki stempel dziurkujący, osadzony w trzonie stempła, który umożliwia precyzyjniejsze wybijanie otworów. Sterowane numerycznie dziurkownice zapewniają najwyższą wydajność produkcji i wysoką precyzję położenia otworów (w granicach $\pm 0,03\text{mm}$). Kąt przyłożenia stempła dla dziurkownic wynosi maksymalnie 3° .

Rys. 2.1.5 - Schemat dziurkowania.



Piłowanie

Piłowanie ręczne

Stale nierdzewne łatwo poddają się cięciu piłą do metali. Ważne jest, aby podczas suwu cięcia występowała znaczna siła nacisku między brzeszczotem a metalem, natomiast podczas suwu powrotnego należy unieść pi-

kę lekko do góry lub zmniejszyć siłę nacisku, w celu uniknięcia umocnienia przez zgniot materiału. Maksymalne tempo cięcia to 50 posunięć na minutę dla brzeszczotów od 7 do 12 zębów na centymetr.

Piłowanie piłą ramową

Piły ramowe mają pionowe ostrza, które tną podczas ruchu posuwisto-zwrotnego. Do piłowania stali nierdzewnych stosuje się ostrza

o krótkich zębach. Maksymalna grubość blachy ciętej tą metodą wynosi około 2,0 mm.

Cięcie frezem

Ta metoda jest stosowana do precyzyjnego cięcia elementów, szczególnie profili kształtowanych oraz rur. Narzędziem jest frez o grubości kilku milimetrów. W celu umożliwienia cięcia pod różnymi kątami należy zmienić kierunek ustawienia uchwytu narzędziowego. Powierzchnia obrabianych elementów ze stali nierdzewnej musi być zabezpieczona przed

uszkodzeniem, mogącym powstać w wyniku kontaktu z układem mocującym. Aby zapobiec deformacji cienkich kształtowników należy w ich wnętrzu umieścić drewniany rdzeń. Wydajność tego procesu można zwiększyć przez jednoczesną obróbkę kilku elementów zamontowanych wspólnie w układzie mocującym.

Cięcie ściernicą

Cięcie ściernicą stosowane jest głównie podczas operacji montażowych oraz do cięcia na niewielkich długościach. Nacisk wywierany przez tarczę ściernicy na cięty element powinien być mały, aby zminimalizować na-

grzewanie się materiału i przebarwienia powierzchni. Jeżeli jest to możliwe, w miejscach wzdłuż krawędzi należy wykonać trawienie i pasywację uszkodzonej powierzchni.

Cięcie piłą taśmową

Cięcie piłą taśmową jest najbardziej rozpowszechnioną metodą cięcia stali nierdzewnych i może być z powodzeniem stosowane

dla grubości metalu od 0,8 do 8 mm. Zależnie od grubości i gatunku stali nierdzewnej, prędkość cięcia zmienia się od 15 do 40 m/min.

Najwyższych prędkości cięcia używa się jedynie dla cienkich arkuszy stali, natomiast prędkość cięcia przy większych grubościach od 1,5 mm musi być ograniczona do przedziału 15 ÷ 30 m/min. W tym przypadku nie jest konieczne stosowanie smarów, ale zaleca się przedmuch sprężonym powietrzem. Strumień sprężonego powietrza powinien być stale skierowany na strefę cięcia w taki sposób, aby jednocześnie usuwać opiłki oraz chłodzić stal. W celu zwiększenia wydajności procesu cienkie arkusze materiału obrabianego można ułożyć w stos i ciąć równocześnie.

Cięcie strumieniem wody

W metodzie tej strumień wody o wysokim ciśnieniu (2000 do 5000 barów) zawierający materiał ścierny o wielkości cząstek od 0,2 do 0,5 mm z granatu lub korundu jest wyrzucany przez dyszę ustawioną prostopadle do obrabianego przedmiotu i może się przesuwac z prędkością rzędu 20 cm/min. Wyrzucany strumień wody ma małą średnicę oraz bardzo wysoką prędkość, rzędu 2-3 krotnej szybkości

Cięcie piłą taśmową z powodzeniem można stosować również do prętów, co jest bardziej wydajne od cięcia piłą posuwisto-zwrotną. Dla pił taśmowych prędkość posuwu taśmy zawiera się w przedziałach od 30 m/min dla stali austenitycznej typu X5CrNi18-10/1.4301 do 40 m/min dla austenitycznej stali automatowej typu X10CrNiS18-09/1.4305 oraz do 45 m/min dla ferrytycznej stali automatowej gatunku X10CrS17/1.4104.

dźwięku, co zapewnia bardzo wysoką jakość ciętych powierzchni. Proces ten może być łatwo zautomatyzowany i dostosowany do cięcia małych serii elementów. Podczas zastosowania tej metody dla stali nierdzewnych zaleca się cięcie arkuszy w stosach o grubości około 10 mm, co znacznie zwiększy efektywność procesu, ponieważ szybkość cięcia nie jest proporcjonalna do grubości ciętego elementu.

Cięcie termiczne

Cięcie palnikiem acetylenowo – tlenowym

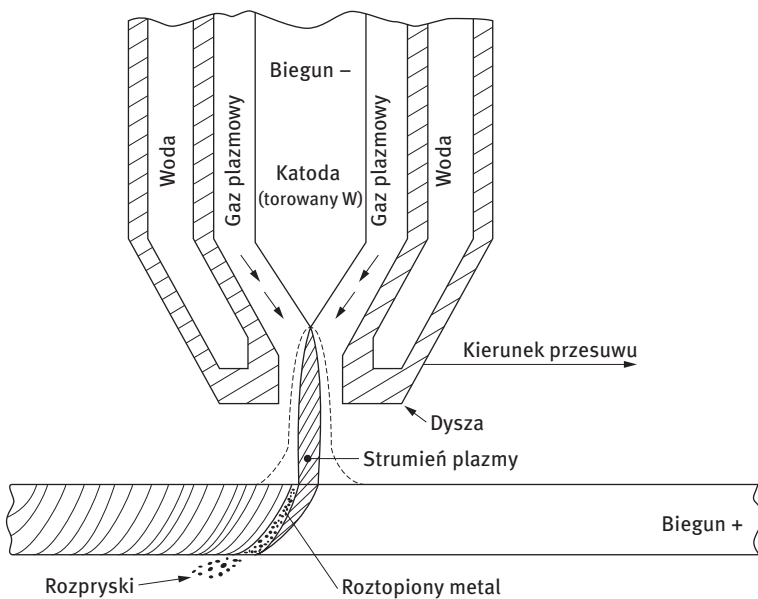
Proces ten został wymieniony jedynie dla pełnej kompletności opisanych procesów i jest rzadko stosowany do cięcia stali nierdzewnych, ponieważ powoduje utlenianie powierzchni i rozległą strefę wpływu ciepła. Czasem jednak może być zastosowany jako rozwiązanie awaryjne.

Sytuacja wygląda inaczej w przypadku cięcia przy użyciu palnika wspomaganego proszkami, który z powodzeniem stosuje się do cięcia płyt ze stali nierdzewnej, odlewanych metodą ciągłą o grubości do 200 mm. W tym przypadku utlenianie powierzchni i przemiany metalurgiczne zachodzące w strefie wpływu ciepła przestają występować.

Cięcie łukiem plazmowym

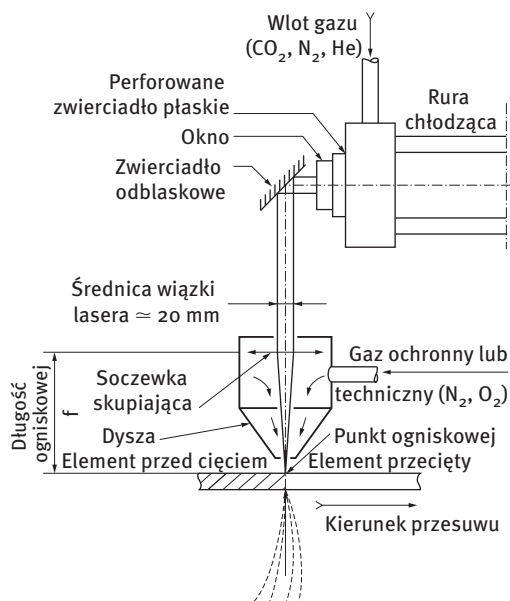
Rys. 2.1.6 - Schemat cięcia łukiem plazmowym.

W tej metodzie metal topiony jest miejscowo, osiągając bardzo wysoką temperaturę ($10000 \div 20000^{\circ}\text{C}$) w wyniku oddziaływania strumienia plazmy (rys. 2.1.6). Plazmą jest silnie



zjonizowany gaz, którym może być argon, mieszaniny wodoru i argonu, azotu i sprężonego powietrza. Stopień utlenienia i zanieczyszczenie krawędzi po procesie cięcia plazmą uzależniony jest od rodzaju zastosowanego gazu, a także typu ciętej stali. Typowo dla stali nierdzewnych wystarcza zazwyczaj szlifowanie na głębokość 0,5 mm, aby usunąć z powierzchni strefę wpływu ciepła. Wykonanie cięcia plazmowego pod wodą pozwala na duże zredukowanie utlenienia powierzchni oraz znacząco podnosi prędkość cięcia. Dla 3 mm blachy austenitycznej stali nierdzewnej typowa prędkość cięcia wynosi około 3,5 m/min. Porównując tę metodę z mechanicznymi procesami cięcia (za wyjątkiem cięcia nożycami wibracyjnymi), strata materiału jest większa. Ponadto krawędź cięcia nie jest prostopadła lecz posiada pewien kąt nachylenia, który wymaga wyeliminowania przez szlifowanie.

Cięcie laserem



Rys. 2.1.7 - Schemat cięcia laserem CO₂

Laser jest urządzeniem emitującym intensywną wiązkę światła (LASER – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Podobnie jak w przypadku spawania, do cięcia stosuje się dwa typy laserów. Lasery CO₂, w których medium emitującym jest mieszanina CO₂-N₂-He oraz lasery typu YAG (itr-aluminium-granat). Cięcie wiązką lasera może być wykonywane zarówno w trybie emisji ciągłej, który pozwala na osiągnięcie wysokich prędkości cięcia, jak i w trybie pulsacyjnym, który ogranicza szerokość strefy wpływu ciepła. W przypadku laserów CO₂ (rys. 2.1.7) zakres mocy wynosi 0,5 ÷ 3 kW, a dla laserów typu YAG do 2 kW, ograniczając przy tym ich prędkość cięcia.

W każdym źródle lasera, wiązka musi zostać przetransportowana do przedmiotu obrabianego przy pomocy układu optycznego zwierciadeł (lasery CO₂) lub światłowodu (lasery YAG). Aby przeciąć metal energia musi zostać skoncentrowana punktowo przez układ ogniskujący tak, aby wytworzyć punkt ogniskowej o średnicy d określonej zależnością $d = \lambda x(f/D)$, gdzie: λ – długość fali światła (10,6 μm dla lasera CO₂); f – długość ogniskowej; D – średnica równoległej wiązki światła przed skupieniem (typowo 20 mm dla lasera CO₂). Głębokość ogniskowania jest proporcjonalna do $\lambda / (f/D)^2$.

Analizując powyższe zależności można zauważyć, że mały punkt ogniskowej wymaga niewielkiej długości ogniskowej (f), podczas gdy duża odległość ogniskowej wymagana jest do otrzymania dużej głębokości skupienia. W praktyce sprowadza się to do umiejętnego znalezienia kompromisu pomiędzy krótką (60 mm) a długą (300 mm) długością ogniskowej. Na przykład długość ogniskowej około 150 mm daje średnicę ogniskową w przybliżeniu 0,3 mm oraz głębokość skupienia nieznacznie mniejszą od milimetra.

Z uwagi na dobre parametry użytkowe, do cięcia stali nierdzewnej używa się głównie laserów CO₂, które pracują na mieszaninie gazów: 40 ÷ 80% helu, 15 ÷ 55% azotu i 3,5 ÷ 7% CO₂. Ponadto podczas procesu „laserowego” stosuje się atmosferę gazów ochronnych (azot lub tlen), które są podawane współśrodkowo dookoła wiązki lasera przez dyszę, w celu usuwania stopionego metalu. Zastosowanie w tym celu tlenu powoduje jego reakcję egzotermiczną z ciętym metalem pozwalającą na większe prędkości cięcia. Aby

uzyskać dobrej jakości krawędź cięcia, wiązka lasera musi być odpowiednio wycelowana wewnątrz dyszy, a także skoncentrowana na górnej powierzchni ciętego arkusza (cienkie blachy) lub w jednej trzeciej grubości arkusza (grube blachy). W tabelicy 2.1.1 przedstawiono prędkości cięcia laserem CO₂ o mocy 1,5 kW dla blachy z austenitycznej stali nierdzewnej 18% Cr – 9% Ni w zależności od zastosowanego gazu ochronnego. Zastosowanie azotu, jako gazu technicznego umożliwia uzyskanie krawędzi cięcia o wysokiej jakości, kosztem spadku prędkości cięcia.

Należy wspomnieć, że cięcie laserem stosuje się z powodzeniem nie tylko do cięcia płaskich arkuszy blachy, lecz także do cięcia kształtowników i np. krótkich rur. Dla lasera zamocowanego nieruchomo, obrabiany przewód rurowy może być prowadzony przez ramię robota, uzyskując cięcie wzdłuż złożonego profilu. Oczywiście, że tak zautomatyzowane operacje są opłacalne tylko dla produkcji wielkoseryjnych. Na przykład taka metoda cięcia stosowana jest przez jednego z wiodących producentów kolektorów wydechowych.

Grubość blachy (mm)	Prędkość cięcia (m/min)
Gaz ochronny = tlen	
1,0	9,0
2,0	5,0
3,0	3,0
6,0	1,5
Gaz ochronny = azot	
1,0	8,0
2,0	3,5
3,0	2,0
6,0	0,5

Tablica 2.1.1. - Prędkości cięcia laserem CO₂ o 1,5 kW mocy dla blachy austenitycznej stali nierdzewnej 18%Cr-9%Ni.

2.2 Obróbka skrawaniem

Wprowadzenie

W licznej grupie metod stosowanych do przetwarzania stali nierdzewnych, obróbka skrawaniem używana jest głównie dla produktów długich, a operacje wiercenia, frezowania i gwintowania są częściej stosowane dla produktów płaskich. W drugim przypadku, operacje te często poprzedzają łączenie mechaniczne śrubami, kołkami lub nitami. Generalnie obróbka skrawaniem jest technologią kształtowania, w której materiał jest usuwany za pomocą narzędzia tnącego. Podatność na obróbkę skrawaniem ściśle zależy od własności obrabianego materiału i daje to początek pojęciu skrawalności w odniesieniu do materiału lub grupy materiałów.

W przypadku stali nierdzewnych, skrawalność przez długi czas rozpatrywano jako drugorzędą własność materiału, co było spowodowane trudnościami w obróbce stali o strukturze austenitycznej. Rozwój technologii metalurgicznych sprawił, że można kontrolować tę własność materiału oraz doprowadził do powstania gatunków stali nierdzewnych łatwych do obróbki skrawaniem (automatowych), w których można wyróżnić dwa podstawowe typy:

- stale automatowe (o podwyższonym stężeniu siarki i fosforu);
- stale automatowe o kontrolowanym stężeniu wtrąceń tlenkowych, których skrawalność jest polepszona przez kontrolowany, zarówno pod względem składu chemicznego, jak i rozmieszczenia, dodatek wtrąceń tlenkowych AlSiCa. Metoda regulowania stężenia wtrąceń tlenkowych może być zastosowana dla niskosiarkowych gatunków stali (zawierających zgodnie z normą do 0,03%S) lub dla gatunków o podwyższonym stężeniu siarki w celu zwiększenia synergicznego działania między tymi metodami.

W obu przypadkach dokładna kontrola składu chemicznego i procesu rafinacji stali zapewnia obecność w strukturze niemetalicznych wtrąceń, które sprzyjają pękaniu wióra oraz tworzą smarującą warstwę na granicy styku między narzędziem a wiórem podczas obróbki skrawaniem.

Kryteria obróbki skrawaniem

Na podatność stali do obróbki skrawaniem ma wpływ wiele czynników, ale z praktycznych względów tylko niektóre z nich mogą być łatwo mierzalne i rozpatrywane. Należą do nich łamliwość wióra, trwałość narzędzia, jakość powierzchni po obróbce (chropowa-

tość powierzchni) i pobór mocy podczas obróbki. Wydajność skrawania zależy więc od parametrów skrawania i własności, jakie uzyskuje obrabiany materiał pod względem wymienionych kryteriów.

Obróbka różnych gatunków stali nierdzewnych

Austenityczne stale nierdzewne

Gatunki te wykazują wysoki stopień umocnienia przez gniot, a w stanie po odkształceniu plastycznym na zimno, ich wysoka wytrzymałość przyczynia się do szybkiego zużycia narzędzi. Jednak nawet w stanie silnie umocnionym przez zgniot, dzięki wysokiej ciągliwości, tworzą długie wióry, które mają tendencje do szepiania się z narzędziem. Występowanie zjawiska szepiania materiału do krawędzi tnącej narzędzia może zwiększyć siły skrawania i w konsekwencji doprowadzić do jego pęknięcia. Wymaga to więc zastosowania dużych sił skrawania, które z kolei powodują szybsze

zużycie narzędzia i ryzyko pęknięcia spowodowane zniszczeniem krawędzi skrawania. Ponadto, przewodność cieplna tych stali jest około trzy razy niższa w porównaniu do zwykłej stali węglowej, co powoduje wytworzenie wysokiej temperatury na styku narzędzie/przedmiot obrabiany i zmniejsza trwałość narzędzia. Z powodu wymienionych przyczyn, generalnie stale austenityczne przeznaczone do obróbki skrawaniem zawierają siarkę w stężeniu od 0,15 do 0,35% i w dalszej części tego rozdziału będą rozpatrywane, jako typowe gatunki o strukturze austenitycznej.

Ferrytyczne stale nierdzewne

Stale ferrytyczne słabiej ulegają umocnieniu przez zgniot niż stale austenityczne, a ich wytrzymałość na rozciąganie wzrasta tylko około 200 N/mm² dla 50% zgniotu w porównaniu do ponad 1000 N/mm² w przypadku niektórych stali austenitycznych. Pomimo, że stale ferrytyczne charakteryzują się wyższą przewodnością cieplną i niższym umocnieniem

zgniotowym w porównaniu do gatunków austenitycznych, to niebezpieczeństwo tworzenia długich wiórów i szepiania z narzędziem pozostaje wysokie. Stale nierdzewne o strukturze ferrytycznej przeznaczone do obróbki skrawaniem posiadają prawie zawsze podwyższone stężenie siarki i fosforu (porównaj część „Wtrącenia siarczkowe”).

Martenzytyczne stale nierdzewne

Gatunki martenzytyczne wykazują podobne własności pod wpływem umocnienia przez zgniot i przewodności cieplnej do stali niskostopowych, szczególnie stali konstrukcyj-

nych. Stale te po obróbce cieplnej hartowania i odpuszczania uzyskują bardzo wysoką wytrzymałość, co wywołuje duże siły skrawania.

Wpływ wtrąceń niemetalicznych

Wtrącenia siarczkowe – stale automatowe o zwiększonym stężeniu siarki

Dobrze znaną techniką polepszającą obrabialność stali jest celowe wprowadzenie wysokiego dodatku siarki w stężeniu od 0,15 do 0,35%. Siarka tworzy w połączeniu z manganem siarczek manganu, który pozytywnie oddziałuje na skrawalność. Dodatek siarki powoduje również niekorzystne zjawiska takie jak obniżenie odporności na korozję wżerową, a ponadto pogarsza podatność na obróbkę plastyczną na gorąco i spawalność z powodu podwyższenia wrażliwości na pękanie na gorąco (głównie dla stali austenitycznych). Wymienione zjawiska

skłoniły metalurgów do poszukiwania innych metod podwyższenia skrawalności (zobacz część „Wtrącenia tlenkowe”). Stale automatowe o podwyższonej skrawalności są dostępne dla trzech grup stali: austenitycznych, ferrytycznych i martenzytycznych. Do obróbki skrawaniem najczęściej stosuje się gatunki:

- X8CrNiS18-9/1.4305 i X6CrNiCuS18-9-2/1.4570 (stal austenityczna);
- X6CrMoS17 / 1.4105 (stal ferrytyczna);
- X12CrS13 / 1.4005 i X29CrS13 / 1.4029 (stal martenzytyczna).

Wtrącenia tlenkowe

Twarde tlenki, które tworzy aluminium (Al_2O_3), krzem (SiO_2) lub chrom (Cr_2O_3) nie odkształcają się i pozostają twarde w wysokiej temperaturze. Takie wtrącenia często występują w stalach nierdzewnych i działają jak materiał ścierny obniżając czas życia narzędzi skrawających. Odpowiednia zmiana parametrów procesu wytapiania i rafinacji stali nierdzewnych umożliwiła uzyskanie wtrąceń tlenków mieszanych SiO_2 -CaO- Al_2O_3 , które w wysokich temperaturach są ciągliwe i ulegają deformacji podczas skrawania oraz silnie wydłużają się w strefie ścinania wióra, zwiększając jego łamliwość. Ze

stali tego typu wytwarza się zarówno produkty długie jak i płaskie. Wtrącenia tlenkowe tworzą na powierzchni narzędzia warstwę smarującą, która ogranicza jego nagrzewanie i zużycie. Na przykład zastosowanie metody kontrolowanego udziału wtrąceń tlenkowych stali typu X5CrNi18-10/1.4301 w porównaniu do standardowego gatunku, powoduje wzrost wydajności toczenia rzędu 25%. W przeciwieństwie do gatunków automatowych o podwyższonym stężeniu siarki, w tych stalach poprawa skrawalności nie odbywa się kosztem obniżenia odporności na korozję.

Synergia między oddziaływaniem dodatku siarki i wtrąceniami ciągliwych tlenków

Połączenie dwóch mechanizmów zwiększenia skrawalności stali nierdzewnych (dodatku siarki i kontrolowanego stężenia wtrąceń tlenkowych) powoduje ich wzajemną synergię i dla gatunku z kontrolowanym dodatkiem

wtrąceń tlenkowych X8CrNiS 18-9/1.4305 może spowodować wzrost wydajności skrawania do 50% w porównaniu do standardowych gatunków stali.

Dobór narzędzi

Głównym czynnikiem, który decyduje o jakości obrabianych powierzchni i wydajności procesu skrawania jest prawidłowy dobór narzędzi skrawających. Można wyróżnić cztery główne grupy materiałów stosowanych do obróbki skrawaniem stali nierdzewnych:

- stale szybko tnące (HSS) pokrywane i niepokrywane twardymi powłokami,
- węgliki spiekane pokrywane twardymi powłokami,
- cermetale,
- ceramika narzędziowa wzmocniana włóknami krzemowymi.

Narzędzia ze stali szybko tnących stosuje się do wiercenia i gwintowania, a narzędzia pokrywane powłokami z węglików spiekanych do toczenia i frezowania (frezowania czółowego). Do najczęściej stosowanych powłok ochronnych należą: węgiel tytanu (TiN), węglikoazotek tytanu {Ti(C,N)} i tlenek aluminium (Al_2O_3). Mogą być one wytwarzane dwoma metodami:

- Fizycznego osadzania z fazy gazowej (PVD) ;
- Chemicznego osadzania z fazy gazowej (CVD).

Powłoki PVD są nanoszone w stosunkowo niskiej temperaturze, a proces zachowuje wytrzymałość krawędzi tnącej i pozwala wytwarzać powłoki na ostrych krawędziach. Powłoki PVD posiadają gładką powierzchnię, która generuje mniej ciepła w wyniku tarcia, co umożliwia użycie niższych sił skrawania, a powierzchnie tnące są odporne na szepianie materiału.

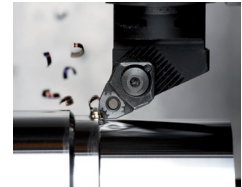
Powłoki CVD są nanoszone na narzędzia w wysokiej temperaturze. Proces powoduje dyfuzję powłoki w głąb materiału podłoża i zapewnia

jej wysoką przyczepność. Umożliwia również nanoszenie powłok wielowarstwowych. Proces CVD jest obecnie jedyną techniką nanoszenia zapewniającą efektywne osadzanie powłok z (Al_2O_3), które umożliwiają obróbkę z dużymi prędkościami skrawania. Powłoki TiN, które zwykle stosowane są na powierzchniach zewnętrznych narzędzi mają kolor złoty (ułatwia to rozpoznawanie wkładek wieloostrzowych i narzędzi), inne powłoki są czarne lub szare.

Określenie cermetale pochodzi od terminów CERamika i METAL. Współczesne cermetale narzędziowe składają się głównie z węglikoazotku Ti(C,N) spiekane go z fazami metalicznymi (Co, Ni, Mo,...), które działają jak faza wiążąca. Cermetale posiadały w przeszłości reputację materiałów o niskiej odporności na zmęczenie cieplne i kruche pękanie.

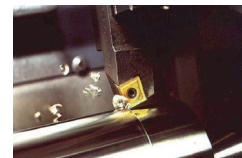
W ostatnich latach opracowano nowe drobnoziarniste typy cermetali narzędziowych, które wykazują wyższą odporność na zmęczenie cieplne oraz możliwość obróbki z dużymi prędkościami skrawania (do 900 m/min). Narzędzia z cermetali stosuje się głównie do obróbki wykańczającej, ponieważ zapewniają wysoką jakość obrabianych powierzchni bez konieczności szlifowania wykańczającego. Nadają się też idealnie do zachowania rygorystycznych tolerancji obróbki.

Narzędzia z ceramiki inżynierskiej nie były dotychczas stosowane do obróbki stali nierdzewnych, zmieniło się to z wprowadzeniem płytek wieloostrzowych z ceramiki wzmocnionej włóknami krzemowymi, które nadają się do obróbki wysokostopowych stali nierdzewnych.

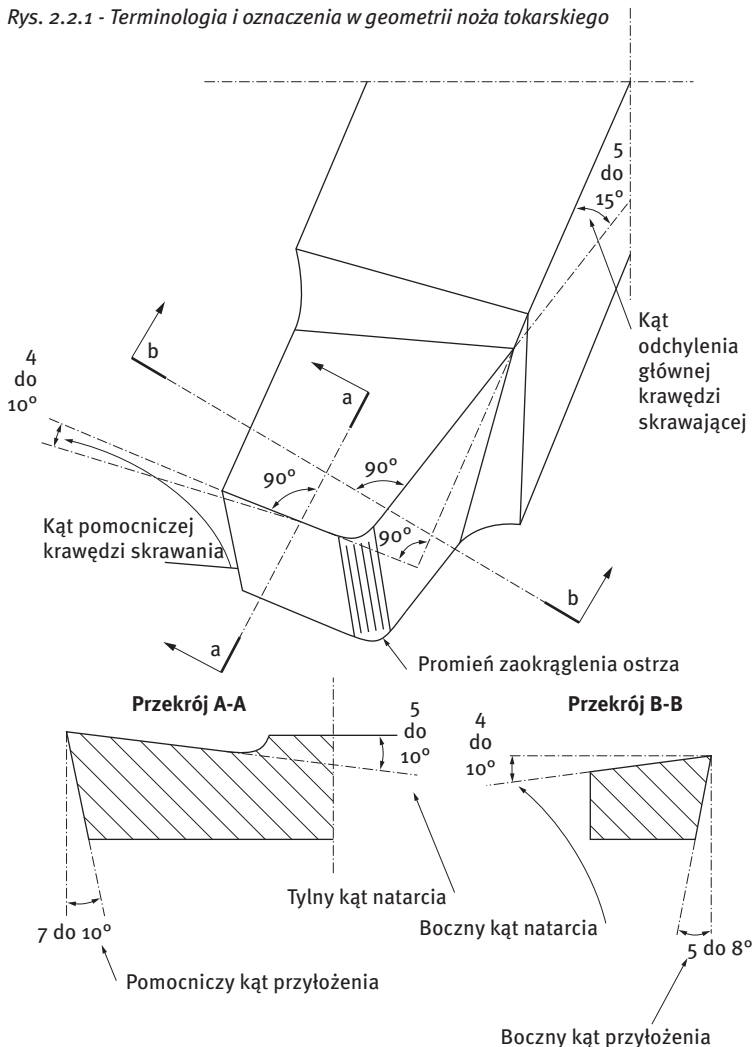


Zdjęcie 5: Pokrywana płytka skrawająca z węglików spiekanych stosowana do toczenia zgrubnego

Zdjęcie 6: Pokrywana płytka skrawająca z cermetali stosowana do toczenia wykańczającego



Rys. 2.2.1 - Terminologia i oznaczenia w geometrii noża tokarskiego



W tabelicy 2.1.1 zestawiono typowe prędkości skrawania stali nierdzewnej dla różnych typów narzędzi.

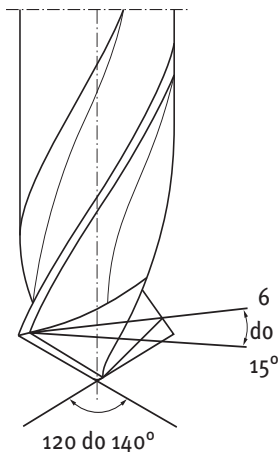
Toczenie na tokarce

Podczas toczenia stali nierdzewnych, przedmiot obrabiany musi być sztywniej zamocowany niż w przypadku stali węglowych. W zależności od gatunku obrabianej stali i zastosowanego typu pokrywanego węgliką spiekanych, prędkość skrawania powinna wynosić między 75-750 m/min, przy posuwie 0,1 ÷ 0,3 mm/obrót. Wyższe prędkości skrawania można stosować dla narzędzi z węglików spiekanych, pokrywanych powłokami CVD podczas obróbki gatunków stali automatowych – o zwiększonej zawartości siarki lub kontrolowanym stężeniu wtrąceń tlenkowych. Dla toczenia zgrubnego prędkość skrawania powinna być zredukowana, natomiast szybkość posuwu zwiększona; odwrotnie w przypadku toczenia wykańczającego. Na rysunku 2.2.1 przedstawiono geometrię typowego narzędzia, wraz z dokładnymi wartościami zależnymi od własności materiału narzędziowego.

Wiercenie

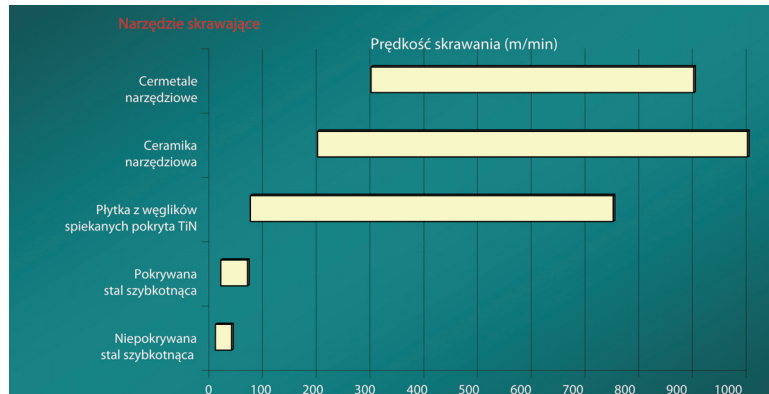
Wiercenie stali nierdzewnych stosuje się zwykle dla produktów długich oraz grubych blach, pasów i płyt. W przypadku wiercenia cienkich blach zaleca się zestawienie kilku w stos, aby wytworzyć solidną podporę podczas procesu. Wiertła o małej średnicy (poniżej 6 mm) zazwyczaj wytwarza się ze stali szybko tnących, pośrednie średnice wiertel produkowane są z (pokrywanych) węglików spiekanych, natomiast największe średnice (powyżej 15 mm) wytwarzane są w formie wkładek z węglików spieka-

Rys. 2.2.2 - Wiertło ze stali szybko tnącej.



nych. Do wiercenia produktów długich i grubych blach lub płyt, kąt wierzchołkowy wiertła powinien wynosić 120-135°, a kąt przyłożenia ostrza 6°. Dla cienkich arkuszy blachy, w celu zmniejszenia naprężeń powierzchniowych, kąt wierzchołkowy wiertła może być zwiększony do 140°, a kąt przyłożenia zmniejszony do 5° (rys. 2.2.2). Prędkość obrotowa wiertła (prędkość skrawania) zależy od materiału, z którego wykonany jest przedmiot obrabiany oraz rodzaju zastosowanego narzędzia. W tabelicy 2.2.2 zestawiono typowe prędkości skrawania.

Przy wierceniu głębokich otworów najpierw zaleca się wiercenie krótkim wiertłem. Należy zapewnić także dopływ smaru do końcówki wiertła oraz jego odpowiednio wysokie ciśnienie ($p > 20$ bar), a także prawidłowe usuwanie wiórów. Aby uniknąć umocnienia zgniotowego powierzchni obrabianych, nie zaleca się nawiercania punktu środkowego. Do tego celu należy stosować wiertła samocentrujące lub wzorniki. Otwory o dużej średnicy uzyskuje się przez wiercenie trepanacyjne - rdzeniowe, w którym wiertło trepanacyjne w kształcie rury wierci w materiale rdzeń, który się następnie usuwa. Narzędzie składa się z jednej, dwu lub trzech regulowanych krawędzi tnących i zwykle wyposażone jest w prowadnicę centrującą.



Wytaczanie i rozwiercanie

Dla powiększenia już istniejącego otworu można zastosować wytaczanie lub rozwiercanie. Do wytaczania stosuje się narzędzia z pokrywanych lub niepokrywanych węglików spiekanych. Aby uniknąć wibracji narzędzia i stożkowatości otworu zaleca się, aby nieoparta długość elementu nie była większa niż czterokrotność średnicy. Stosowane prędkości skrawania są znacznie niższe niż dla toczenia przy tych samych głębokościach skrawania. Z reguły przyjmuje się współczynnik redukcji rzędu 0,5 dla standardowych stali nierdzewnych i 0,67-0,75 dla gatunków automatowych. Można stosować takie same prędkości posuwu jak dla toczenia pod warunkiem, że dłu-

Tablica. 2.1.1. - Zakres prędkości skrawaniem stali nierdzewnych dla różnych typów narzędzi

Tablica 2.2.2. - Prędkość skrawania dla różnych gatunków stali nierdzewnych w zależności od średnicy wiertła.

Średnica wiertła Materiał obrabiany	3 mm		6 mm		12 mm		18 mm	
	Prędkość skrawania ⁽¹⁾ m/min	Posuw ⁽¹⁾ mm/obr	Prędkość skrawania ⁽¹⁾ m/min	Posuw ⁽¹⁾ mm/obr	Prędkość skrawania ⁽¹⁾ m/min	Posuw ⁽¹⁾ mm/obr	Prędkość skrawania ⁽¹⁾ m/min	Posuw ⁽¹⁾ mm/obr
X5CrNi18-10 / 1.4301	16	0,09	18	0,11	20	0,15	22	0,18
“COT” ⁽²⁾ X5CrNi18-10 / 1.4301	20	0,09	22	0,11	25	0,15	28	0,18
“COT” ⁽²⁾ X8CrNi18-9 / 1.4305	26	0,17	32	0,20	37	0,24	40	0,30
“COT” ⁽²⁾ X14CrMoS17 / 1.4104	35	0,30	38	0,35	43	0,42	50	0,50
X2CrNiMoN22-5-3 / 1.4462	14	0,09	16	0,11	18	0,15	20	0,18

⁽¹⁾ Parametry obróbki dla wiercenia przez 15m bez zmiany narzędzia

⁽²⁾ COT: “Controlled Oxide Treated” – Kontrolowane stężenia wtrąceń tlenkowych

$$\text{Prędkość obrotowa (obr./min)} = \frac{1000 \times \text{Prędkość skrawania (m/min)}}{\pi \times \text{średnica wiertła (mm)}}$$

gość niepodpartej części nie będzie większa niż czterokrotność średnicy. W przeciwnym razie dla posuwu przyjętego przy toczeniu należy zastosować współczynnik redukcji 0,67.

Dla wykańczających operacji rozwiercania używa się zwykle rozwiertaków z zębami prostymi lub spiralnymi. Kąt natarcia wynosi 3-8°, a kąt przyłożenia ostrza około 7°. Rozwiertaki ręczne mogą być zakończone tępo, natomiast nakrój rozwiertaków maszynowych wynosi ok.

40°. Podczas rozwiercania stali automatowych stosuje się prędkość skrawania identyczną jak dla wiercenia wiertłem ze stali szybko tnącej. Dla gatunków standardowych musi być ona zredukowana o współczynnik 0,67, a nawet o 0,5 w porównaniu do prędkości przyjętej dla wiercenia. Prędkość posuwu zależy głównie od średnicy rozwiertaka i wynosi 0,1 - 0,2 mm/obr. dla średnic 3 - 4 mm i 0,3 - 0,9 mm/obr. dla średnic 8 - 12 mm.

Frezowanie

Z powodu relatywnie wysokich sił skrawających wymaga się zastosowania frezarek o dużej mocy, a także wyeliminowania wszelkich luzów szczególnie podczas frezowania współbieżnego. Tak jak przy toczeniu, zaleca się narzędzia z pokrywanych węglików spiekanych. Dla frezów walcowo-czołowych z węglików spiekanych, możliwe jest skrawanie z prędkością 90 - 200 m/min dla gatunków stali automatowych i 50 - 150 m/min

dla gatunków standardowych. Dla frezowania czołowego prędkość posuwu wynosi 0,012-0,125 mm/obrót/zęb, w zależności od średnicy frezu. W przypadku frezowania czołowego z użyciem narzędzi z wkładkami z węglików spiekanych prędkość skrawania wynosi 80-400 m/min dla stali automatowych i 50-300 m/min dla gatunków standardowych. Prędkości posuwu wynosi 0,05-0,2 mm/obrót/zęb.

Gwintowanie

Gwintowanie jest szczególnie trudne dla stali austenitycznych, a zwłaszcza dla otworów o niewielkiej średnicy. Skłonność do tworzenia ciągłych wiórów może grozić uszkodzeniem narzędzia. Dlatego należy stosować gwintow-

niki o trzech rowkach dla małych średnic oraz o czterech rowkach dla średnic większych. Kąt natarcia wynosi zwykle 10-15°, a prędkość gwintowania 5-30 m/min. Podczas procesu należy stosować intensywne smarowanie.

Nacinanie gwintów

Wyróżnia się kilka metod nacinania gwintów:

- na tokarce narzędziem jednoostrzowym z wkładką z węglików spiekanych,
- na narzynkach lub gwintownikach,
- za pomocą toczenia na okrągłych narzynkach.

Szybkości skrawania dla jednoostrzowego nacinania gwintów powinny stanowić dwie trzecie szybkości skrawania dla toczenia stali automatowych oraz połowę dla gatunków standardowych. W przypadku innych procesów nacinania gwintów, prędkość nacinania zawiera się między 5 a 25 m/min.

2.3 Obróbka plastyczna na zimno

Gięcie

Zagadnienia ogólne

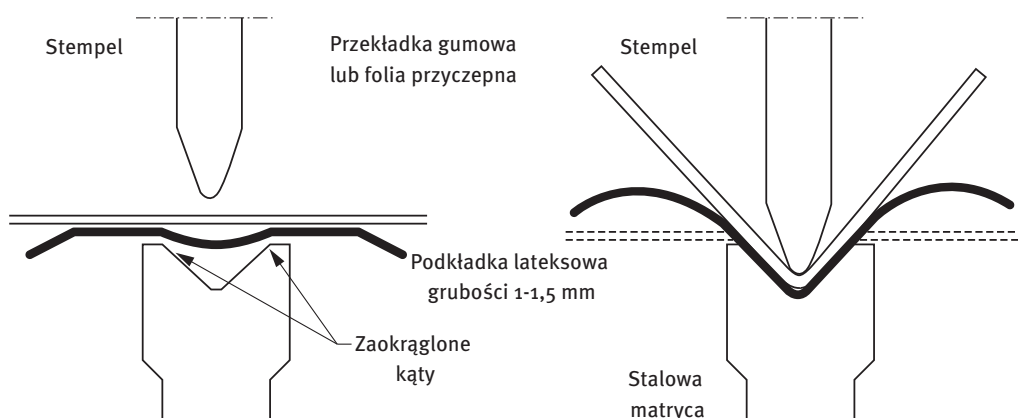
Procedury i oprzyrządowanie stosowane do gięcia stali nierdzewnych zasadniczo niczym nie różnią się od tych, stosowanych do gięcia stali miękkich. Jediną różnicą jest siła potrzebna do gięcia stali nierdzewnych, która jest około 50 do 60% większa od sił stosowanych dla stali miękkich. Ponadto zjawisko powrotnego odkształcenia sprężystego (sprężynowa-

nia) jest również większe dla austenitycznych stali nierdzewnych, co wymaga zdecydowanie odmiennych kątów gięcia w porównaniu do stali miękkich. Dla stali w stanie wyżarzonym minimalny promień gięcia jest równy grubości blachy, natomiast dla stali odkształconych plastycznie na zimno powinien być zwiększony do około 6 grubości blachy.

Ochrona powierzchni blach ze stali nierdzewnej

Bardzo często gięcie stali nierdzewnych odbywa się przez kontakt niezabezpieczonych powierzchni stali z elementami oprzyrządowania (matryca, stempel). Tarcie powstałe podczas gięcia powoduje zarysowania lub w przypadku braku poślizgu wgniecenia spowodowane niedoskonałością powierzchni narzędzia. Takie zjawiska mogą być akceptowane dla niewidocznych elementów konstrukcyjnych, jednak są niedopuszczalne w przypadku elementów dekoracyjnych, prze-

twórstwa żywności lub inżynierii chemicznej. W celu uniknięcia uszkodzenia powierzchni blachy zaleca się umieszczenie między narzędziem a przedmiotem obrabianym gumowej (lateksowej) podkładki o grubości ok. 1mm (rys. 2.3.1). Blachy ze stali nierdzewnej są coraz częściej dostarczane wraz z tymczasową warstwą ochronną, którą można usunąć po zakończeniu gięcia, zaraz przed wprowadzeniem elementu do eksploatacji.



Rys. 2.3.1 - Gięcie z przekładką gumową, która chroni przednią powierzchnię elementu

Gięcie ręczne

Stale nierdzewne mogą być gięte bez większych problemów pod warunkiem, że we-

wnętrzny promień gięcia nie jest mniejszy od grubości giętej blachy.

Gięcie w prasach krawędziowych

Prasy krawędziowe doskonale nadają się do gięcia blach ze stali nierdzewnej pod warunkiem, że elementy maszyn są utrzymywane w czystości a jakość powierzchni narzędzi jest kontrolowana. Prasy krawędziowe zazwyczaj są przystosowane do obróbki arkuszy o szerokości do 3 m i grubości maks. do 3 mm.

Bardzo dobrze nadają się do gięcia profili o zmiennym przekroju. W zasadzie nie mogą zginać materiału do kątów ostrych, a minimalny wew. promień gięcia jest dwa razy większy od grubości blachy. Spotyka się jeszcze prasy ręczne, ale większość maszyn jest już napędzana silnikiem elektrycznym.

Gięcie w hydraulicznych prasach krawędziowych

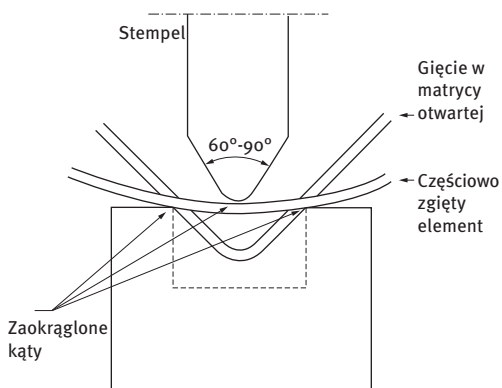
Zastosowanie pras hydraulicznych umożliwia wysoką elastyczność i dobrą regularność gięcia. Ten typ maszyn jest odpowiedni do gięcia blach z różnych gatunków stali nierdzewnych, przeznaczonych do produkcji profili, paneli i okładzin ściennych. Są także stosowane do gięcia materiałów dla budownictwa i zastosowań dekoracyjnych. Pozwalają uzyskać wysoką jakość powierzchni jeżeli stosuje się narzędzia w dobrym stanie i odpowiednio zabezpieczy powierzchnie obrabiane.

Powszechnie stosuje się cztery metody gięcia stali nierdzewnych:

- w matrycy otwartej,
- w matrycy zamkniętej,
- w matrycy zamkniętej z dotłaczaniem,
- z podkładką gumową.

Gięcie w matrycy otwartej

W tej metodzie arkusz stali podparty jest na matrycy w dwóch punktach, pomiędzy którymi stempel wywiera nacisk (rys. 2.3.2). Stempel nie dociska blachy na maksymalną głębokość, lecz zatrzymuje się w ściśle określonym położeniu. Dobór kształtu matrycy zależy od kąta gięcia. Najczęściej stosuje się matrycę w kształcie U. Ta metoda wymaga uwzględnienia powrotnego odkształcenia sprężystego materiału. Umożliwia gięcie cienkich blach pod różnymi kątami stosując jedno oprzyrządowanie, ale wewnętrzny promień gięcia jest zawsze duży i nie może być zagwarantowany.



Rys. 2.3.2 - Schemat gięcia w matrycy otwartej.

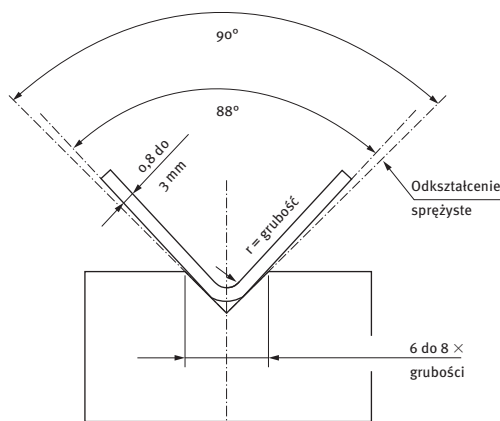
Gięcie w matrycy zamkniętej

W tym przypadku stempel lub ostrze wciska blachę w kierunku dna i boków matrycy, lecz bez odkształceń w wyniku ciągnięcia, a blacha przyjmuje kształt narzędzia. Wewnętrzny promień gięcia jest zwykle równy grubości giętej blachy (rys. 2.3.3). Proces ten wymaga narzędzi odpowiednich dlażądanego kąta gięcia i promienia. Na przykład, dla efektywnego kąta

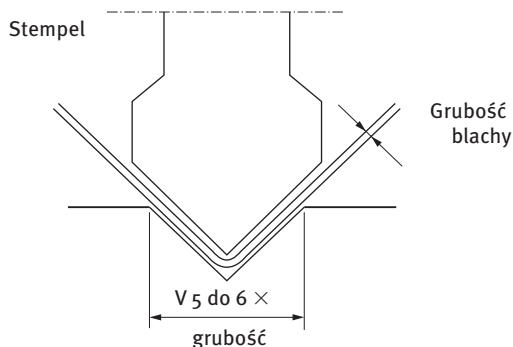
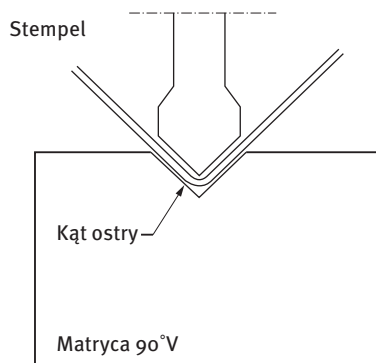
gięcia 90° należy zastosować matrycę typu V o kącie rozwarcia między 85 a 89° , co umożliwi powrotne odkształcenie sprężyste materiału. Szerokość rozwarcia matrycy powinna wynosić $4 - 5$ grubości dla blach cienkich i $6 - 8$ grubości dla blach o średniej grubości (ok. 2 mm).

Gięcie w matrycy zamkniętej z dotłaczaniem

W tej metodzie gięcie odbywa się w dwóch etapach. Pierwszy odpowiada zginaniu w matrycy otwartej, gdzie uzyskuje się pożądaną kąt gięcia. W drugim etapie stempel z dużą prędkością uderza w krawędź gięcia tak, aby ją trwale odkształcić i zredukować lub wyeliminować odkształcenie sprężyste. Proces może być stosowany do dokładnego gięcia blachy ze stali nierdzewnej o grubości do $1,5$ mm. Minimalny wewnętrzny promień gięcia może być równy połowie grubości giętej blachy (rys. 2.3.4). Uderzenie stempla powoduje lokalne odkształcenie materiału, a nawet przewężenie materiału w miejscu gięcia i co za tym idzie osłabienie materiału w tym miejscu.



Rys. 2.3.3 - Gięcie w matrycy zamkniętej.



Rys. 2.3.4 - Gięcie w matrycy zamkniętej z dotłaczaniem.

Gięcie z podkładką gumową

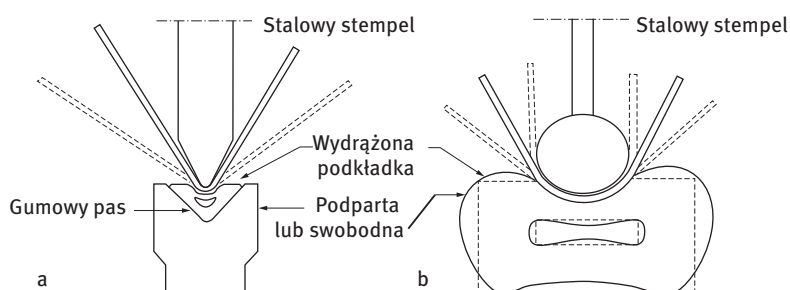
Dla polepszenia jakości powierzchni giętych elementów zaleca się wykonywanie operacji gięcia w matrycy z zastosowaniem podkładki gumowej o odpowiedniej twardości (Shore'a). W rzeczywistości, gumowa podkładka za-

stępuje konwencjonalną matrycę stalową i umożliwia gięcie elementów o złożonym kształcie oraz elementów na zastosowania dekoracyjne. Metoda może być stosowana dla stali nierdzewnych o grubości od 0,4 do 1,5 mm i ma dwie główne zalety:

- możliwość zastąpienia kosztownych matryc stalowych przez pojedynczą podkładkę gumową;
- wysoka jakość powierzchni stali po kontakcie z podkładką gumową, co eliminuje kosztowne operacje polerowania wykańczającego.

Możliwości tej metody dla gięcia na kształt V przedstawiono na rysunku 2.3.5a, a dla tłoczniaka o przekroju okrągłym na rysunku 2.3.5b.

Rys. 2.3.5a - Gięcie z podkładką gumową a) na kształt V, b) wzornikiem okrągłym.



Obliczanie długości rozwinięcia kształtowanych blach

Ponieważ podczas gięcia następuje swobodne odkształcenie metalu, wewnętrzne włókna materiału ulegają ścisłaniu i stają się krótsze, podczas gdy włókna zewnętrzne są rozciągane i ulegają wydłużeniu. Jedynie włókna neutralne nie zmieniają swojej długości. Dlatego to

właśnie one są stosowane do obliczania długości rozwinięcia zginanych blach, dla średnich i małych grubości blach. Dla cienkich blach o grubości poniżej 1mm, obliczenia wykonuje się na podstawie najgłębiej położonych włókien materiału.

Powrotne odkształcenie sprężyste (sprężynowanie)

Stopień powrotnego odkształcenia sprężystego materiału zależy od rodzaju giętej stali nierdzewnej, jej własności mechanicznych, w szczególności podatności na utwardzanie w wyniku zgniotu, a także geometrii gięcia włącznie z promieniem gięcia i grubością blachy. Na bazie powyższych parametrów można określić kąt gięcia oraz kąty stempla i matrycy wymagane do uzyskania trwałego

zgięcia po usunięciu nacisku narzędzia. Na przykład, jeżeli promień krzywizny równy jest grubości blachy, to kąt narzędzia musi wynosić 0,97 razy pożądaną kąt gięcia dla gatunku stali X5CrNi18-10 / 1.4301 w stanie wyżarzonym oraz 0,90 dla tego samego materiału w stanie utwardzonym C1000 (1/2 hard).

Kształtowanie na walcarkach trójwalcowych

Informacje ogólne

Trójwalcowe walcarki mechaniczne są stosowane do kształtowania z blach elementów cylindrycznych. Urządzenia przeznaczone dla

stali miękkich mogą być z powodzeniem używane dla stali nierdzewnych, ale ich wydajność będzie zredukowana o około 30%.

Operacje kształtowania na walcarkach trójwalcowych

Przed gięciem między walcami koniec arkusza blachy jest zazwyczaj zaginany w matrycy z okrągłym tłoczniem. W stosowanych maszynach promień zaginania jest regulowany

przez wewnętrzny walec gnący, pokrywający 1/8 - 1/6 przekroju. Pole powierzchni rozwinętej jest obliczane w ten sam sposób jak dla zginania.

Tłoczenie

Podstawy teoretyczne

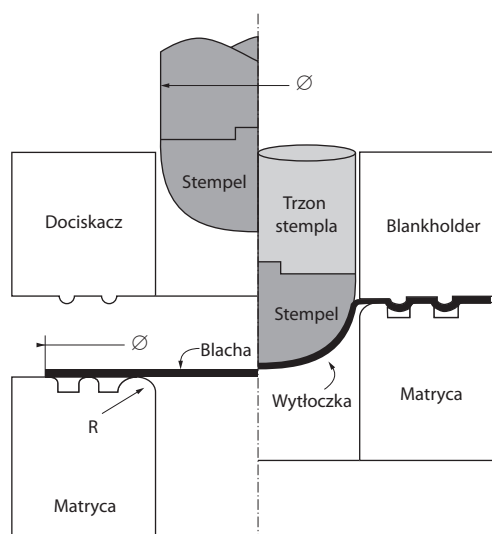
Tłoczenie jest operacją formowania stosowaną do produkcji kształtowników zamkniętych z płaskich arkuszy blachy lub z krążków. Jest to proces złożony, podczas którego metal przechodzi przez wiele stanów wywołanych kombinacją różnych naprężeń rozciągających i ściskających. Ogólny stan odkształceń w arkuszu blachy można właściwie opisać za pomocą odkształceń w trzech głównych kierunkach:

- wzdłużnym (równoległe do głównego kierunku odkształcenia): $\varepsilon_1 = \ln(l/l_0)$, gdzie l_0 jest długością początkową elementu, a l długością końcową;
- poprzecznym (w płaszczyźnie blachy, prostopadle do głównego kierunku odkształcenia): $\varepsilon_2 = \ln(w/w_0)$, gdzie w_0 jest szerokością początkową elementu, a w szerokością końcową;

- na grubości: $\varepsilon_3 = \ln(t/t_0)$, gdzie t_0 oznacza początkową grubość elementu, a t grubość końcową.

Z uwagi na zachowanie stałej objętości podczas odkształcenia, $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$.

Podczas tłoczenia występują dwa główne mechanizmy odkształcania. Pierwszy jest nazy-



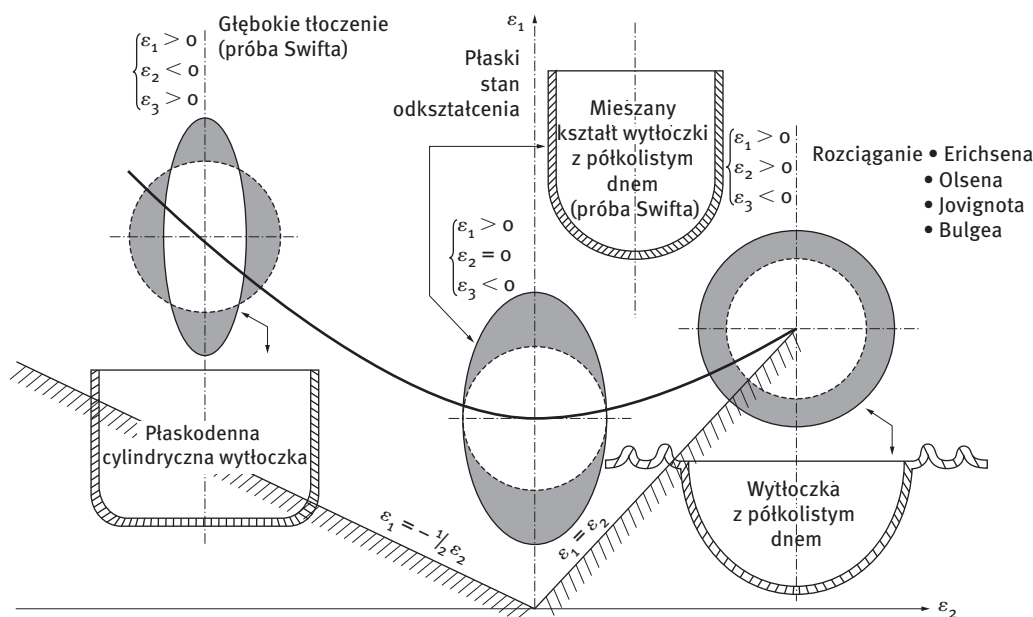
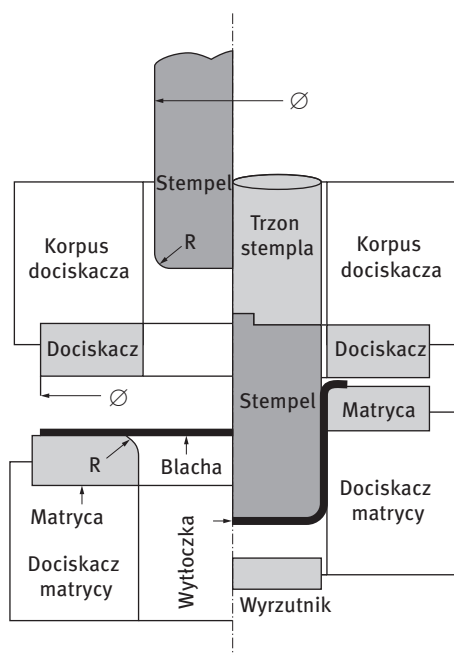
Rys. 2.3.6 - Odkształcenie przez rozciąganie podczas wytłaczania: blacha zamocowana nieruchomo między matrycą a dociskaczem.

wany rozciąganiem (wytlaczanie) lub dwuosio-
wym rozciąganiem (rys. 2.3.6), które zachodzi
podczas odkształcenia blachy zamocowanej
nieruchomo między matrycą a dociskaczem.
Kolejny mechanizm nazywany jest ciągnięciem
(tłoczenie) lub ściskaniem w płaskim stanie
odkształcenia (rys. 2.3.7), w którym metal jest

wgnięty przez stempel swobodnie ślizgając
się między powierzchniami matrycy i dociska-
cza, w ten sposób formując ściankę lub obrzeże
produktu. Podczas rozciągania (wytlaczania)
walcowy stempel ma głowicę w kształcie półko-
listym, zaś przy ciągnięciu (tłoczenie) głowica
stempla jest płaska. Rysunek 2.3.8 przedsta-
wia główne rodzaje odkształceń występujące w
wytłoczkach odkształconych podczas różnych
prób tłoczności (Swifta, Erichsena, itd.).

Najwierniejsze przedstawienie odkształceń w
elemente podczas kształtowania i po jego zakoń-
czeniu obrazują odkształcenia graniczne. Mogą
być one przedstawione na dwuwymiarowym wy-
kresie, którego prostopadłe osie odpowiadają
odkształceniom głównym ϵ_1 oraz ϵ_2 . Obszar roz-
ciągania określony jest w przybliżeniu przez płasz-
czyznę między liniami $\epsilon_1 = \epsilon_2$ oraz $\epsilon_1 = -2\epsilon_2$. Obszar
ciągnięcia w przybliżeniu odpowiada płaszcz-
yźnie pomiędzy liniami $\epsilon_1 = -2\epsilon_2$ oraz $\epsilon_1 = -\epsilon_2/2$. Przy
ciągnięciu, największe znaczenie ma wzrost gru-
bości na obrzeżach produktu ($\epsilon_1 > 0$) natomiast
przy rozciąganiu metal ulega pocienieniu ($\epsilon_1 < 0$)
pod głowicą stempla.

Rys. 2.3.7 -
Odkształcenie przez
ciągnięcie podczas
głębokiego tłoczenia:
blacha ślizga się
swobodnie między
matrycą i dociskaczem.



Rys. 2.3.8 - Mechanizmy
odkształcenia podczas
tłoczenia, zilustrowane
przez różne próby
tłoczności.

W próbie miseczkowania Swifta krążek blachy jest wytłaczany w matrycy pod naciskiem stempla o płaskim zakończeniu $\varnothing 33$. Metoda ma na celu wyznaczenie granicznego współczynnika tłoczenia (LDR), który określany jest jako maksymalny stosunek między średnicą wytłaczanego krążka blachy i średnicą stempla dla którego powstały element jest całkowicie pozbawiony wad ($LDR = \max. \text{średnica krążka blachy} / \text{średnica stempla}$). W tabelicy 2.3.1 zawarto wartości granicznego współczynnika tłoczenia dla wybranych gatunków stali.

Pomimo iż całkowita zdolność do wytłaczania austenitycznych stali nierdzewnych (stopy Cr-Ni) jest większa niż gatunków ferrytycznych (stopy Fe-Cr), to z danych zebranych w tabelicy wynika, że doskonałą podatność do tłoczenia wykazuje stabilizowana tytanem stal ferrytyczna z 17% Cr. W przypadku elementów tłoczonych gatunek ten może okazać się doskonałym zamiennikiem dla znacznie droższych stopów austenitycznych.

Najczęściej stosowanymi metodami określania tłoczności jest próba Erichsena podczas rozciągania i Swifta podczas ciągnięcia. W próbie Erichsena arkusz blachy jest dokładnie dociśnięty do matrycy dociskaczem i następnie wtlaczany, aż do momentu powstania przewężenia, które przechodzi w uszkodzenie materiału. W tym punkcie mierzona jest głębokość tłoczenia znana też jako „wskaźnik tłoczności Erichsena”.

W tabelicy 2.3.2 przedstawiono wartości wskaźnika tłoczności Erichsena dla tych samych gatunków stali, dla grubości wytłaczanej blachy 0,8 mm. W takiej metodzie odkształcenia uwidacznia się znacznie wyższa podatność na kształtowanie austenitycznej stali nierdzewnej typu X5CrNi 18-10.

Oznaczenie europejskie: EN 10088-2		LDR (granicznego współczynnika tłoczenia)
Znak	Numer	
X6Cr17	1.4016	2,05–2,10
X3CrTi17	1.4510	2,15–2,25
X5CrNi18-10	1.4301	2,00–2,05

Z ogólnego punktu widzenia zdolność stali nierdzewnych do kształtowania może być określona na podstawie wykresu rzeczywistego naprężenia w funkcji odkształcenia $\sigma = f(\epsilon)$, wyznaczonego w próbie rozciągania. Krzywa ta dostarcza informacji o umocnieniu zgniotowym, a obszar pod nią odpowiada pracy zużytej na uzyskanie danego stopnia odkształcenia. Nachylenie krzywej w każdym punkcie odpowiada wielkości umocnienia zgniotowego. Wspomniana krzywa zazwyczaj opisywana jest zależnością $\sigma = f(\epsilon) = k\epsilon^n$. Wykładnik potęgowy n nazywany jest wykładnikiem umocnienia. Ponieważ jego wartość jest stała w szerokim zakresie odkształceń jest on odpowiednim miernikiem umocnienia i może być obliczony na podstawie krzywej $\ln \sigma = f(\ln \epsilon)$. Podczas próby rozciągania próbek płaskich, oprócz odkształcenia wzdłużnego (ϵ_1) możliwe jest zmierzenie odkształceń rzeczywistych szerokości (ϵ_2) oraz grubości (ϵ_3), między którymi zachodzi proporcjonalna zależność $r = \epsilon_2 / \epsilon_3$, gdzie r – wskaźnik anizotropii mechanicznej. W ten sposób łatwo wskazać tendencję blach metalowych do przyrostu grubości lub pocieniania podczas kształtowania. Jeżeli $r < 1$ materiał będzie wykazywał tendencję do pocieniania, a gdy $r > 1$ do przyrostu grubości.

Tablica 2.3.1 - Graniczny współczynnik tłoczenia (LDR) określony w próbie Swifta na krążkach ze stali nierdzewnej o grubości 8 mm.

Oznaczenie europejskie: EN 10088-2		Wskaźnik tłoczności Erichsena (mm)
Znak	Numer	
X6Cr17	1.4016	8,7
X3CrTi17	1.4510	9,6
X5CrNi18-10	1.4301	11,5

Tablica 2.3.2. - Wskaźnik tłoczności Erichsena dla blachy o grubości 0,8 mm z ferrytycznej i austenitycznej stali nierdzewnej

Współczynnik anizotropii plastycznej zazwyczaj zależy od kierunku odkształcenia w stosunku do kierunku walcowania blachy. Dla określenia anizotropii blachy należy zmierzyć r przy kątach nachylenia do płaszczyzny walcowania 90° , 45° oraz 0° . Współczynniki anizotropii zdefiniowane są następująco:

- wskaźnik anizotropii normalnej:

$$r_n = (r_o + r_{90} + 2 r_{45}) / 4$$

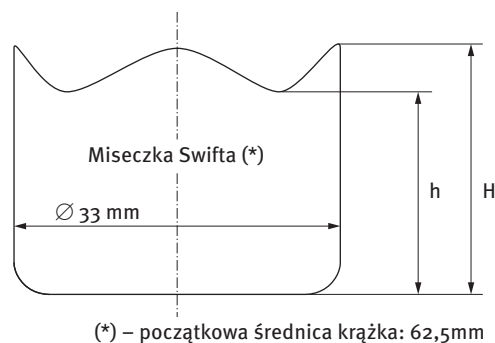
- wskaźnik anizotropii płaskiej:

$$\Delta r = (r_o + r_{90} - 2 r_{45}) / 2$$

Powyższe zależności nie zawsze właściwie opisują zachowanie się stali nierdzewnych, dla których zaleca się stosowanie poniższego wzoru:

$$\Delta r = [(r_o - r_n)^2 + (r_{90} - r_n)^2 + (r_{45} - r_n)^2]^{1/2}$$

Rys. 2.3.9 - Skłonność do tworzenia tzw. „uch” dla różnych gatunków stali nierdzewnych



$$\text{Wskaźnik powstawania uch(\%)} = \frac{H - h}{H + h} \times 200$$

Oznaczenie europejskie		Δr	Wskaźnik powstawania uch (%)
Znak	Numer		
X6Cr17	1.4016	0,50	8 do 12
X3CrTi17	1.4510	0,35	4 do 6
X5CrNi18-10	1.4301	0,45	5 do 7

Tablica 2.3.3 - Wskaźniki anizotropii normalnej i płaskiej oraz współczynnik umocnienia dla różnych gatunków stali.

Oznaczenie: EN 10088-2		r_n	Δr	n
Znak	Numer			
X6Cr17	1.4016	1,1/1,6	0,50	0,20/0,25
X3CrTi17	1.4510	1,6/2,0	0,35	0,22/0,28
X5CrNi18-10	1.4301	1,0/1,3	0,45	0,50/0,70

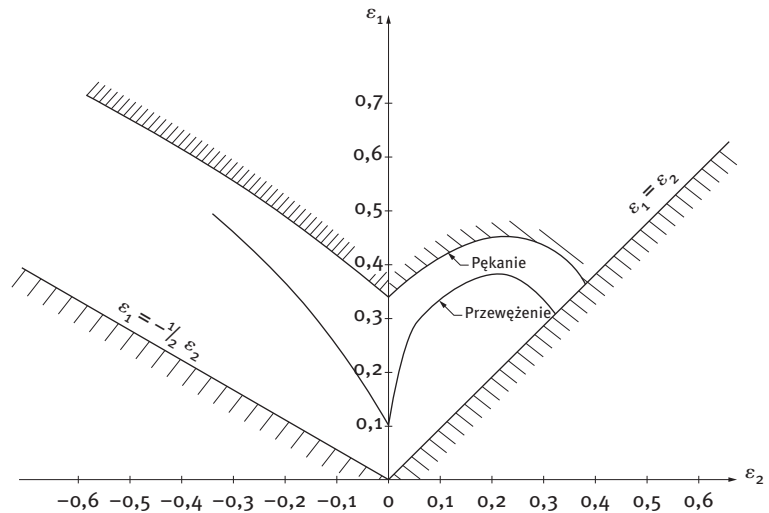
Normalny wskaźnik anizotropii mechanicznej r_n dobrze charakteryzuje zdolność do odkształcenia w wyniku ciągnięcia, podczas gdy wskaźnik anizotropii płaskiej Δr może być skorelowany z wielkością tzw. „uch” powstających podczas tłoczenia (rys. 2.3.9). Istnieje dobra korelacja między wykładnikiem umocnienia n , wskaźnikiem anizotropii normalnym r_n i wynikiem próby Erichsena (rozciąganie) i Swifta (ciągnięcie).

Do operacji formowania, w których głównym typem odkształcenia jest rozciąganie należy stosować materiał o wysokiej wartości parametru n . Przeciwnie, kiedy dominującym typem odkształcenia jest ciągnięcie, materiał powinien charakteryzować się wysokim wskaźnikiem anizotropii normalnej r_n . W rzeczywistości parametry n i r_n są właściwe dla całości materiału, podczas gdy zjawiska krytyczne w procesie tłoczenia zachodzą lokalnie (przewężenie i pęknięcie). Parametry te dają ogólne pojęcie o zjawiskach podczas odkształcania różnych materiałów i ich podatności do tłoczenia, ale pozostają nieprzydatne podczas analizy ściśle określonego przypadku. W tablicy 2.3.3 podano charakterystyczne wartości parametrów n , r_n , Δr dla głównych gatunków stali ferrytycznych i austenitycznych przeznaczonych do tłoczenia.

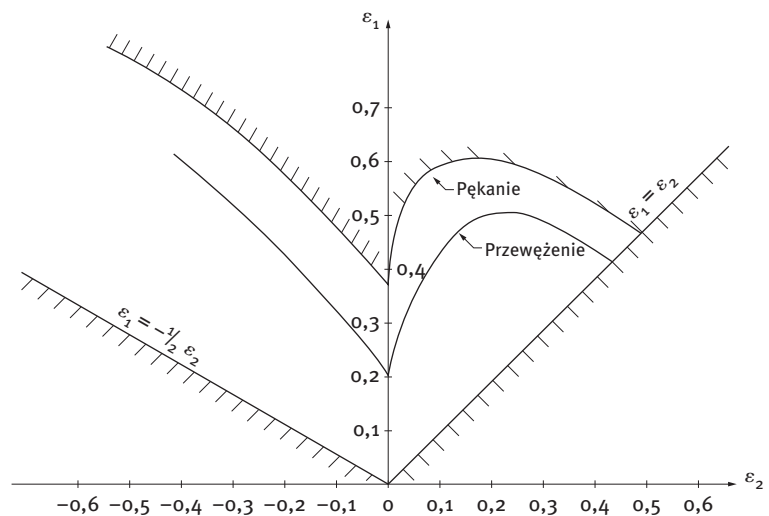
Wspomniane lokalne zjawiska (powstawanie szyjki i pęknięcia) mogą mieć kilka przyczyn. Niektóre z nich są związane z parametrami strukturalnymi takimi jak wielkość ziarna, wielkość i rozmieszczenie wtrąceń lub wydzielen, chropowatość powierzchni, które wpływają na zatrzymywanie smaru na obrabianej powierzchni, itd. Do najważniejszych czynników technologicznych, które odgrywają rolę w omawianych zjawiskach należy szczelina między stemplem a matrycą, ich geometria, siła docisku i cechy narzędzia oraz jakość ich powierzchni, a także rodzaj zastosowanego smaru.

Krzywe odkształcalności granicznej

Lokalne odkształcenia podczas i po procesie formowania są opisane warunkami głównych odkształceń rzeczywistych, ε_1 w kierunku wzdłużnym (czasem oznaczane jako ε_r dla odkształceń promieniowych w przypadku elementów okrągłych) i ε_2 w kierunku poprzecznym (lub ε_c dla odkształceń obwodowych w elementach okrągłych). Różne oddziaływania odkształceń głównych prowadzące do zapoczątkowania przewężenia lub pęknięcia materiału mogą być przedstawione na jednym wykresie nazywanym wykresem odkształcalności granicznej. Na rysunku 2.3.10 przedstawiono wykres odkształcalności granicznej dla ferrytycznej stali z 17% Cr gatunku X6Cr17/1.4016, a na rysunku 2.3.11 dla stali austenitycznej zawierającej 18% dodatek Cr i 9%Ni X5CrNi18-10/1.4301. Podczas ciągnięcia możliwe jest jedynie wydłużenie w kierunku wartości dodatnich, dlatego na wykresie jest rozpatrywana tylko ta część skali (ε_1). Oś rzędnych dzieli zakresy ciągnięcia ($\varepsilon_2 > 0$) i rozciągania ($\varepsilon_2 < 0$). Odkształcenia główne ε_1 i ε_2 mogą być mierzone z całkowitej zmiany wymiarowej badanej próbki, jak i bardziej niedokładnie odczytywane na podstawie lokalnych deformacji siatki wyrysowanej na powierzchni próbki podczas próby tłoczności. Siatka do pomiaru odkształceń głównych składa się zazwyczaj z nakładających się na siebie 2mm okręgów wytwarzanych na badanej próbce metodą trawienia elektrochemicznego. Ich pomiaru dokonuje się metodami optycznymi stosując dziesięciokrotne powiększenie. Krzywe odkształcalności granicznej przedstawione na rysunkach 2.3.10 i 2.3.11 bazują na sześciu typach badań, wykonanych na próbkach gładkich i z karbem w próbie rozciągania, a także



Rys. 2.3.10 - Krzywa odkształcalności granicznej stali X6Cr17 / 1.4016.



Rys. 2.3.11 - Krzywa odkształcalności granicznej stali X5CrNi18-10 / 1.4301.

próbach tłoczności Erichsena, Olsena, Bulgea i Swifta przy zastosowaniu różnych smarów.

Wykreślając wykres odkształcalności granicznych przyjmuje się założenie, że tor odkształcenia jest liniowy i stosunek $\varepsilon_2 / \varepsilon_1$ pozostaje stały. Założenie to nie jest jednak prawdziwe w praktyce, ponieważ na podstawie badań wykazano, że rzeczywisty tor odkształcenia wpływa na pozycję krzywej odkształcalności

ści granicznej. Jeżeli początkowe odkształcenie przebiega zgodnie z mechanizmem ciągnięcia i końcowym odkształceniem jest dwuosiowe rozciąganie lub rozszerzanie, to wystąpi zjawisko przewężenia lub pęknięcia materiału w punkcie znacznie ponad krzywą odkształcalności granicznej. W przypadku, gdy odkształcenie rozpocznie się przez rozciąganie i zakończy w obszarze ciągnięcia to pęknięcie i przewężenie nastąpi nieznacznie pod krzywą odkształcalności granicznej.

Modelowanie i symulacja

Modelowanie i symulacja numeryczna procesów tłoczenia może być wykonana za pomocą metody elementów skończonych (MES), w której formowany element jest dzielony na dużą liczbę bardzo małych figur geometrycznych – elementów reprezentowanych przez siatkę. W oprogramowaniu stosowanym do symulacji procesów tłoczenia, zjawiska zachodzące dla

Opryzrządowanie

Cechy geometryczne i własności mechaniczne zastosowanego opryzrządowania odgrywają decydujący wpływ na warunki tarcia w trakcie obróbki i przez to na płynięcie metalu podczas formowania. W przypadku głębokiego tłoczenia opryzrządowanie wykonane z brązów aluminiowych zapewnia najwyższą wydajność procesu tłoczenia, podczas gdy dla wysokich nacisków można stosować zarówno martenzytyczną stal nierdzewną o 13% stężeniu chromu obrobioną cieplnie do twardości 60HRC jak i żeliwo stopowe, którego współczynnik tarcia zawiera się między wartościami charakterystycznymi dla brązów aluminiowych i stali.

Promień zastosowanego stempla powinien zapewniać swobodne płynięcie metalu bez ry-

W praktyce przemysłowej znajomość rzeczywistych pól odkształceń elementów tłoczonych wraz z wiedzą o ich krzywych odkształcalności granicznej zapewnia możliwość dokładnej kontroli procesów formowania. Jeżeli zmierzone pola odkształceń granicznych znajdują się blisko krzywej odkształcalności granicznej, to występuje duże ryzyko powstania defektów formowanych elementów. Przeciwnie, jeżeli będą one znacznie poniżej krzywej odkształcalności, to ryzyko będzie niskie.

każdego z elementów są opisane równaniami matematycznymi, które uwzględniają: zjawiska płynięcia dla rozpatrywanego typu materiału oraz tarcia między formowanym elementem a powierzchniami narzędzi formujących. Możliwe jest również wykonanie analizy odwrotnej i wyznaczenie optymalnej geometrii półwyrobu dla otrzymania zadanego kształtu produktu.

zyka zatarcia. Dla ferrytycznych stali nierdzewnych minimalny promień stempla powinien wynosić sześciokrotność grubości tłoczony blachy, a dla stali austenitycznych może być mniejszy i wynosić czterokrotność grubości blachy. Promień krzywizny matrycy R jest zasadniczo określony przez średnicę wytłoczki D , promień stempla d oraz grubość blachy t . Dla pierwszego przepustu formowania stosuje się następującą zależność:

$$R = 0,8 [t \times (D - d)]^{1/2}$$

Dla kolejnych przepustów, promień matrycy przepustu n jest wyznaczany jako: $R_n = (d_{n-1} - d_n)/2$, gdzie d_{n-1} i d_n to średnice stempli dla przepustów $n-1$ i n . Szczelina pomiędzy stemplem i matrycą musi być wystarczająca

dla umożliwienia swobodnego płynięcia metalu. W praktyce jest ona dobierana jako dwa razy grubość formowanego materiału plus dwa razy

jego tolerancja grubości plus dwa razy przyrost grubości spowodowany wytłaczaniem plus dwa razy grubość warstwy smarnej.

Smarowanie

Odpowiednie smarowanie wytłoczki i elementów formujących jest zasadnicze dla prawidłowego wykonania procesu tłoczenia. Pomimo, że powierzchnia stali nierdzewnych jest generalnie gładsza od innych tłoczonych materiałów to należy szczególnie unikać niepożądanych zmian wyglądu powierzchni oraz zapobiegać zjawiskom szepiania, które ograniczają czas eksploatacji narzędzi. Ponadto dla elementów o wymaganej jakości powierzchni po obróbce należy zastosować smar, który będzie łatwo usuwalny z powierzchni, szczególnie w przypadku, gdy zawiera on substancje korozyjnie agresywne.

Do najczęściej stosowanych środków smarowych należą rozpuszczalne oleje mineralne z dodatkiem około 20% wody i tak zwane „wysoko-

kociśnieniowe” oleje mineralne, które dobrze nadają się do głębokiego tłoczenia. Produkty smarne mogą zawierać związki chloru i w takiej sytuacji muszą być koniecznie usunięte z powierzchni przez gruntowne mycie i płukanie, co zapobiegnie korozji elementów tłoczonych.

Materiał wejściowy do tłoczenia ze stali nierdzewnej jest często pokryty ochronną folią z tworzywa sztucznego o grubości między 20 a 100µ, która zarówno chroni powierzchnię elementu przed uszkodzeniem jak i spełnia zadanie warstwy smarnej. Gruba folia z PVC umożliwia głębokie tłoczenie w jednej operacji przepustu, podczas gdy cienkie folie z polietylenu są stosowane podczas płytkich operacji tłoczenia, które zawsze są wykonywane w jednym przepuście.

Przykład zastosowania

Opisany przykład jest jednym z wielu możliwych zastosowań tłoczenia dla stali nierdzewnych i służy do przedstawienia ogólnych zasad stosowania tego procesu. Opisano płaskodenny cylinder o średnicy 115 mm i wysokości 260 mm wytworzony z blachy o grubości 1 mm ze stali austenitycznej gatunku X5CrNi18-10. Promień przejścia między dnem a ścianką boczną wynosi 10 mm. Z podanej charakterystyki wynika, że jest to element przeznaczony do zastosowania procesu głębokiego tłoczenia.

Właściwy wymiar krążka blachy jest wyznaczany z wykresów, bazując na końcowej geometrii elementu. W tym przypadku średnica krążka wynosi 365 mm. Ponieważ wysokość elementu (260 mm) jest ponad dwa razy więk-

sza od średnicy ($2 \times 115 = 230$ mm), nie można go wykonać w jednej operacji przepustu. W tabelicy 2.3.4 podano wartości współczynnika wytłaczania, czyli dopuszczalny stosunek między średnicą stempla a początkową lub pośrednią średnicą wytłoczki dla kolejnych przepustów.

Dla pierwszego przepustu ze współczynnikiem wytłaczania 0,55, średnica pośredniej wytłoczki będzie wynosić $365 \times 0,55 = 200$ mm. W celu uzyskania wymaganej średnicy końcowej

Tablica 2.3.4 - Współczynnik wytłaczania określający stosunek między średnicą stempla a początkową lub pośrednią średnicą wytłoczki dla różnych gatunków stali nierdzewnej.

Oznaczenie europejskie: EN 10088-2		Stosunek średnicy stempla i wytłoczki (pierwszy przepust)	Stosunek średnicy stempla i wytłoczki (kolejne przepusty)
Znak	Numer		
X6Cr17	1.4016	0,60	0,80
X3CrTi17	1.4510	0,52	0,80
X5CrNi18-10	1.4301	0,55	0,80

elementu są niezbędne kolejne trzy przepusty ze współczynnikiem wyłaczania 0,8. W ten sposób w drugim przepuście średnica może być zmniejszona do $200 \times 0,8 = 160$ mm, a zastosowanie współczynnika 0,85 dla trzeciego i czwartego przepustu pozwoli uzyskać wymiary $160 \times 0,85 = 136$ mm i $136 \times 0,85 = 115$ mm. W przedstawionym przykładzie skumulowany współczynnik wyłaczania wynosi 0,55 po pierwszym przepuście, 0,44 po drugim, 0,37 po trzecim i 0,31 po czwartym.

Wzrost udziału zgniotu po pierwszym przepuście powoduje stopniowe utwardzenie ma-

teriału, które powyżej twardości 35-40 HRC uniemożliwia jego dalsze tłoczenie. Wartość ta jest uzyskiwana dla skumulowanego współczynnika wyłaczania około 0,4. W celu przywrócenia początkowej podatności do kształtowania materiał należy poddać wyżarzaniu. W przypadku zastosowania atmosfery utleniającej po obróbce cieplnej konieczne jest wykonanie trawienia i pasywacji. W przedstawionym przykładzie skumulowany współczynnik wyłaczania już po drugim przepuście wynosi prawie 0,4 i przez to w tym etapie należy wykonać wyżarzanie.

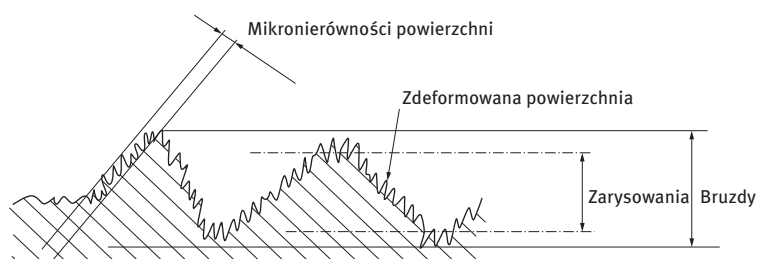
Szczególne zjawiska różnych gatunków stali podczas wyłaczania „Rysy” i „bruzdy”

Niestabilizowane gatunki stali ferrytycznych, zwane również półferrytycznymi są skłonne do tworzenia wad powierzchniowych w formie rys i bruzd w wyniku niektórych operacji kształtowania. Na przykład w elementach przerabianych plastycznie, a następnie poddanych gięciu lub tłoczeniu. Najpopularniejszym gatunkiem w tej grupie stali jest X6Cr17/1.4016. Bruzdowanie odnosi się do całkowitego profilu zniekształconej powierzchni i zawiera zarówno makro- jak i mikrogeometryczne falistości – „rysy” spowodowane przez deformację (np. około 15% wydłużeniem w próbie rozciągania) (rys. 2.3.12).

Dodatki pierwiastków stabilizujących, takich jak tytan, wpływają na modyfikację tekstury krystalograficznej powodowanej tłoczeniem i zmniejszają ryzyko wystąpienia wad w formie rys. Należy pamiętać, że mikrogeometria powierzchni zależy głównie od wielkości ziarna, a wpływ dodatków stabilizujących jest drugorzędny. Pod tym względem bardzo dobre rezultaty uzyskuje stabilizowany gatunek X3CrTi17/1.4510, co spowodowało jego znaczne rozpowszechnienie się, jako zamiennika dla stali austenitycznych w wielu zastosowaniach do głębokiego tłoczenia.

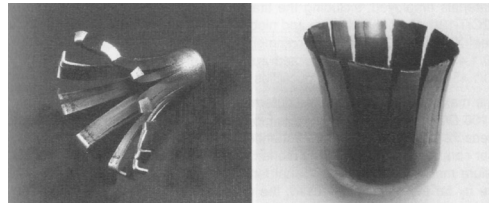
Gatunki stabilizowane niobem charakteryzują się wysoką jakością obrabianych powierzchni i podatnością na polerowanie, a stabilizowane niobem są bardziej podatne na fałdowanie powierzchni. Odpowiednie zbilansowanie dodatków stabilizujących niobu i tytanu zapewnia otrzymanie pożądanych własności powierzchni stali po procesie formowania.

Rys. 2.3.12 - Schematyczne przedstawienie zjawiska fałdowania powierzchni ferrytycznej stali nierdzewnej.



Opóźnione pękanie wytłoczki

Niestabilizowane austenityczne stale nierdzewne mają skłonność do opóźnionego pęknięcia wzdłużnego wytłoczki po znacznym odkształceniu w wyniku głębokiego tłoczenia. Pęknięcia takie pojawiają się po upływie pewnego czasu od zakończenia procesu formowania, co jest spowodowane umocnieniem przez zgniot w wyniku przemiany części austenitu w martenzyt. Wystąpienie takiej przemiany jest uzależnione od składu chemicznego stali oraz temperatury i szybkości odkształcenia podczas formowania. Powstanie martenzytu może być korzystne podczas odkształcenia przez rozciąganie, gdzie występujące umocnienie zgniotowe przeciwdziała powstawaniu przewężenia. Jednak w elementach o małej grubości, gdzie głównym typem odkształcenia jest ciągnięcie, nadmierny udział martenzytu powstałego w wyniku zgniotu może spowodować pękanie wytłoczki, gdy współczynnik tłoczenia jest wyższy od krytycznej wartości dla danej temperatury (rys. 2.3.13). Na przykład dla niestabilizowanej stali austenitycznej zawierającej 17%Cr i 7%Ni odkształconej



Rys. 2.3.13 - Przykład opóźnionego pęknięcia wytłoczki z austenitycznej stali nierdzewnej wytwarzanej w procesie głębokiego tłoczenia. Po lewej: płaskodenna wytłoczka z kołnierzem. Po prawej: płaskodenna wytłoczka bez kołnierza.

w temp. 20 °C ryzyko opóźnionego pęknięcia występuje dla współczynnika tłoczenia większego od 1,5.

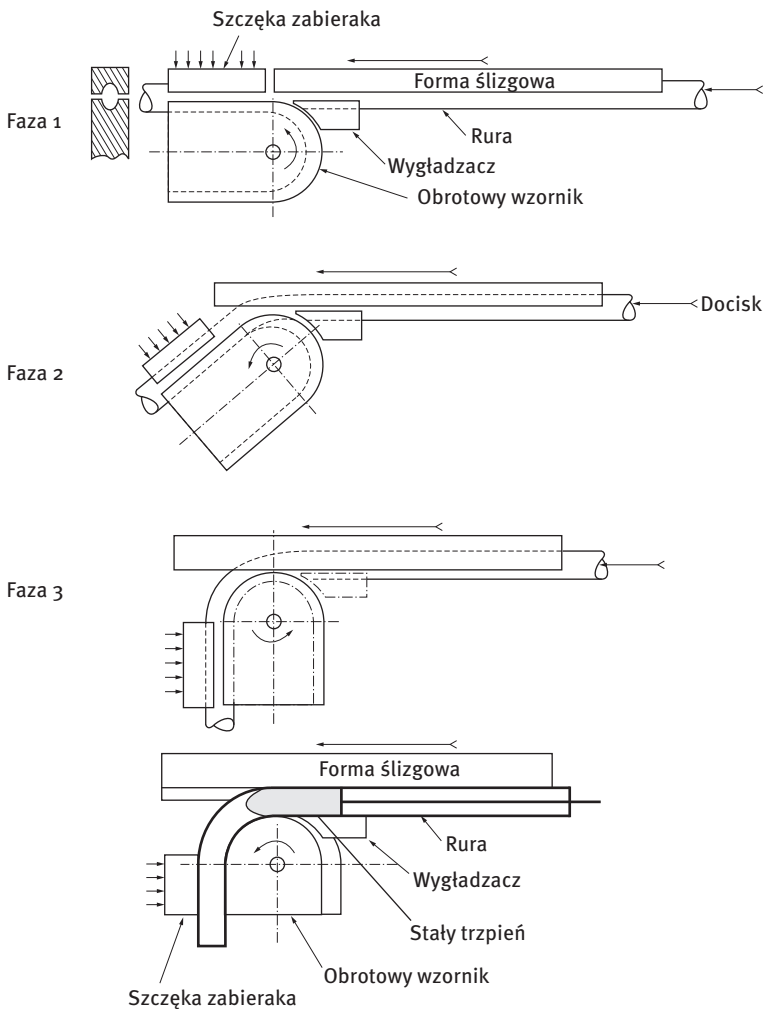
W celu zminimalizowania ryzyka wystąpienia takiego zjawiska, kształt wytłoczki musi być właściwie zoptymalizowany z uwzględnieniem końcowej geometrii kształtowanego elementu, a odcinane krawędzie muszą mieć wysoką jakość. Ponadto różne operacje formowania muszą być zakończone w odpowiedniej kolejności, ze szczególną kontrolą temperatury obrabianego elementu. Bezpośrednio po zakończeniu formowania, po ostatnim przepuszczeniu elementu obrabianego musi być poddany okrawaniu brzegów. Na zakończenie można wykonać wyżarzanie odprężające, przynajmniej przez 2 godziny w temperaturze około 200 °C.

Gięcie rur

Operacja gięcia rur ze stali nierdzewnej jest coraz częściej stosowana w przemyśle samochodowym, gdzie rury z tych stali znajdują szerokie zastosowanie w elementach układów wydechowych. Wszystkie stosowane tam materiały charakteryzują się dobrą plastycznością, co jest szczególnie ważne w tym procesie. Należą do nich: stabilizowane tytanem stale ferrytyczne z 11% Cr gatunku X2CrTi12/1.4512, stabilizowane tytanem i niobem stale ferrytyczne z 17% Cr gatunku

X2CrTiNb18/1.4509 oraz stale austenityczne gatunku X5CrNi18-10/1.4301 i stabilizowane tytanem stale austenityczne gatunku X6CrNiTi18-10/1.4541.

Maksymalne wydłużenie w skrajnych włóknach giętego materiału jest wyrażone równaniem: $e (\%) = 100 D / 2R$, gdzie D – zewnętrzna średnica rury, R – promień gięcia mierzony w osi rury. Z praktyki wynika, że maksymalne wydłużenie, któremu może ulec rura jest od 5% do 30% wyższe od maksymalnego wydłużenia do

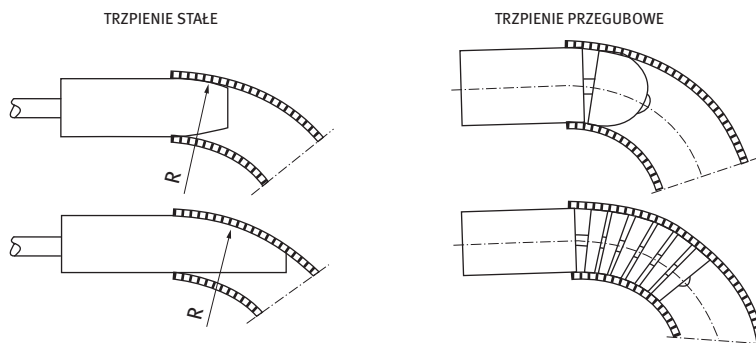


Rys. 2.3.14 - Giętarka do rur.

zerwania zmierzonego w konwencjonalnej próbie rozciągania. Dla rur cienkościennych, które są zdecydowanie najczęściej stosowane w praktyce przemysłowej, stosunek między średnicą D i grubością t jest określony zależnością

$15 < D/t < 40$. W takim obszarze geometrii rury, stosunek wygięcia R/D bliski 1 można uzyskać stosując nowoczesne maszyny technologiczne, zarówno dla ferrytycznych jak i austenitycznych gatunków stali nierdzewnej. Dla zapewnienia takiego poziomu wydajności procesu gięcia konieczne jest zastosowanie giętarek hydraulicznych wyposażonych w ruchomą matrycę i wygładzacz wraz z systemem wywierającym docisk na rurę podczas gięcia (rys. 2.3.14).

Stały trzpień wprowadzony do wnętrza rury (rys. 2.3.15) również odgrywa ważną rolę w procesie gięcia. Zastosowanie sztywnego trzpienia jest właściwe dla dużych promieni gięcia, podczas gdy trzpienie przegubowe stosuje się do promieni mniejszych. W celu właściwego użycia trzpieni przegubowych zastosowana giętarka musi być wyposażona w system cofania trzpienia o odpowiednio dużej mocy i długości przesunięcia. Równie ważnym czynnikiem procesu gięcia jest zapewnienie odpowiedniego smarowania elementów, które musi umożliwiać swobodny poślizg trzpienia po powierzchni rury. Występowanie dużych sił nacisku na powierzchni styku rury i trzpienia wymaga zastosowania olei wysokociśnieniowych (hipoidalnych). Olej w takich urządzeniach jest doprowadzany automatycznie bezpośrednio z trzpienia, co zapewnia stałe warunki smarowania powierzchni formowniczych.



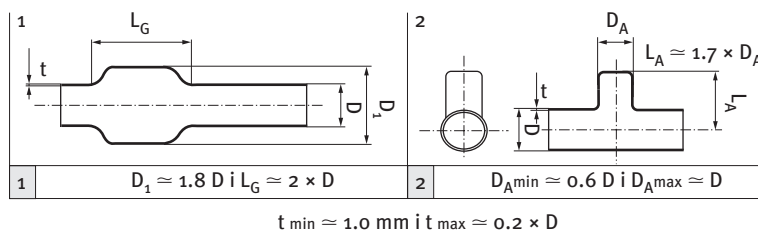
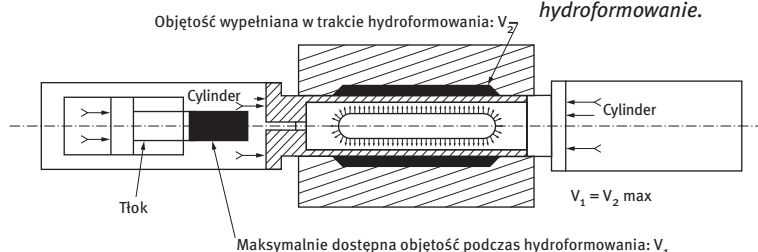
Rys. 2.3.15 - Trzpienie stosowane podczas gięcia rur.

Hydroformowanie rur

Pomimo, że technika hydroformowania stali austenitycznych jest dobrze znana od ponad 30 lat, to w ostatnim okresie odnotowuje się wzrost jej popularności spowodowany rozwojem maszyn technologicznych do hydroformowania. Obecnie, do hydroformowania stosuje się ciecze pod ciśnieniem 3000 bar, które wtryskiwane do wnętrza rury nadają jej ostateczny kształt w kilka sekund. W tym procesie stal nierdzewna odkształca się tylko w wyniku rozciągania, co umożliwia jej łatwe kształtowanie dzięki dobrym własnościom plastycznym (rys. 2.3.16). Unika się przy tym także lokalnych różnic w odkształceniu, a sam proces jest łatwiej przewidywalny na podstawie krzywych odkształcalności granicznej. W porównaniu do technik konwencjonalnych w hydroformowaniu stempel zastąpiono cieczą, co wyeliminowało problem właściwego smarowania.

Pierwsze z zastosowaniem tej technologii były produkowane rury ze stali nierdzewnej na układy

Rys. 2.3.16 - Sposób kształtowania rur przez hydroformowanie.

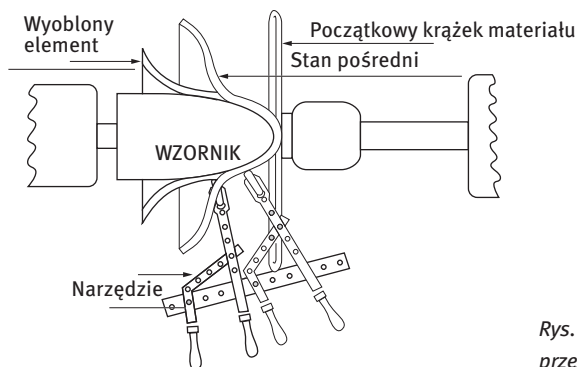


wydechowe, w szczególności kolektory wylotowe produkowane ze stali typu X15CrNiSi20-12/1.4828 (rys. 2.3.17) i X6CrNiTi18-10/1.4541. Przez hydroformowanie wytwarza się również złożone kształty elementów ze wstępnie tłoczonych cylindrycznych wytłoczek w gatunku X5CrNi18-10/1.4301.

Rys. 2.3.17 - Geometria hydroformowanej rury z austenitycznej stali nierdzewnej gatunku X15CrNiSi20-12/1.4828.

Wyoblanie

Podczas wyoblania narzędzie dociska krążek blachy obracający się wokół wzornika (zamocowanego na tokarce). Narzędzie kształtujące zwykle przykładane jest ręcznie do powierzchni obrabianej. Formowanie odbywa się stopniowo w kilku przejściach, dopóki cała formowana powierzchnia nie zetknie się ze wzornikiem. W wyoblaniu grubość blachy praktycznie nie ulega pocienieniu i proces może być rozpatrywany jako metoda formowania bez zmiany grubości kształtowanego elementu (rys. 2.3.18). Siła wywierana przez narzędzie powoduje głównie naprężenia ściskające, co prowadzi do szybkiego umocnienia powierzchni. Z tego powodu



Rys. 2.3.18 - Formowanie przez wyoblanie.

wyoblanie stosuje się dla blach cienkich o grubości od 0,3 do 2,0 mm.

Stale nierdzewne przeznaczone do wyoblania powinny charakteryzować się niską grani-

czą plastyczności i umacniać się wolno poniżej występujących naprężeń ściskających. Pod tym względem szczególnie nadają się gatunki stali ferrytycznej X6Cr17/1.4016 i stabilizowane X3CrTi17/1.4510, X2CrTiNb18/1.4509. Wynika to z ich niskiego współczynnika umocnienia przez zgniot. Dla stali austenitycznych, mało podatnych na przemianę martenzytyczną przez zgniot, obwodowa prędkość kształtowania przy wyoblaniu zależy od średnicy wytłoczki. Dla wytłoczek o średnicy do 200 mm prędkość kształtowania wynosi ok. 600 m/min, a dla większych rozmiarów do 800 mm jest zredukowana do 300 m/min.

Podczas wyoblania należy zapewnić właściwe smarowanie, aby zapobiec szczieniu

Zgniatanie obrotowe

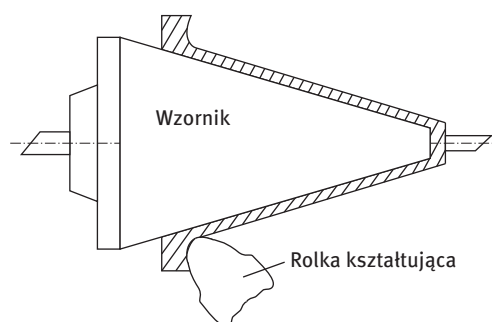
Zgniatanie obrotowe jest rodzajem kształtowania pokrewnym do wyoblania. Nazywane jest także wyciskaniem obrotowym lub wyoblaniem ze zmniejszeniem grubości. Główna różnica polega na niewielkim zmniejszeniu grubości materiału, a odkształcenie podczas formowania przebiega w wyniku rozciągania. W tej metodzie narzędziem jest obrotowa rolka przemieszczana prostopadle do powierzchni wzornika, wokół którego zginany jest krążek blachy. Narzędzie do powierzchni dociskane jest ręcznie lub za pomocą siłownika. Kształt wewnętrzny obrabianego elementu odpowiada dokładnie geometrii użytego wzornika (rys. 2.3.19). Tą techniką najczęściej wytwarza się stożki o kącie wierzchołkowym od 10° do 60° . W porównaniu do wyoblania umożliwia lepszą kontrolę grubości ścianek. W zależności od geometrii elementu i typu stali nierdzewnej można uzyskać redukcję grubości ścianki rzędu 60%.

się narzędzia z formowanym elementem. Ze względu na wysokie siły nacisku zaleca się stosować „wysoko ciśnieniowe” oleje mineralne.

Wyoblanie wymaga niskich nakładów kapitałowych w porównaniu do tłoczenia, ale jego wydajność jest dość niska. Głównie stosowane jest do produkcji prototypów lub małych serii elementów. Mechanizmy odkształcenia w wyoblaniu różnią się od tych dla tłoczenia, dlatego po wykonaniu prototypu tą techniką należy ponownie przeanalizować mechanizmy formowania dla elementów przeznaczonych do produkcji seryjnej przez głębokie tłoczenie.

Odmianą tego procesu jest cylindryczne zgniatanie obrotowe, które jest stosowane do wytwarzania głębokich elementów o dużym stosunku wysokości do średnicy z cylindrycznych płaskodennych wytłoczek. W tym przypadku, w zależności od użytej stali nierdzewnej i charakterystyki rolek formujących prędkość przemieszczania rolek po powierzchni wzornika zawiera się pomiędzy 200 a 800 mm/min.

Rys. 2.3.19 - Formowanie przez zginanie obrotowe.



2.4 Obróbka plastyczna na gorąco

Dla stali nierdzewnych zaleca się stosowanie obróbki plastycznej na zimno, ponieważ procesy formowania na gorąco prowadzą do utleniania powierzchni stali obniżając odporność korozyjną w środowisku wilgotnym. W przypadku zastosowania formowania na gorąco należy przywrócić właściwości warstwy pasywnej stali przeprowadzając procesy trawienia i repasywacji.

Formowanie na gorąco austenitycznych stali nierdzewnych

Obróbkę plastyczną na gorąco zasadniczo stosuje się dla grubych blach z austenitycznej stali nierdzewnej. Obróbka musi być wykonana w temperaturze od 950 do 1300 °C. Podczas procesu należy unikać przedłużonego wygrzewania stali w zakresie temperatury od 500 do 900 °C, zarówno w fazie nagrzewania jak i chłodzenia. Jeżeli szybkość chłodzenia



Zdjęcie 7: Konstrukcja ze stali i szkła „La lentille de la cour de Rome” - Paryż (F)

z temperatury obróbki plastycznej na gorąco jest niewystarczająco duża, to należy zastosować dodatkowe wyżarzanie w temperaturze 1100 °C z przyśpieszonym chłodzeniem do temperatury pokojowej.

Formowanie na gorąco ferrytycznych stali nierdzewnych

W tym przypadku obróbkę plastyczną na gorąco wykonuje się w zakresie temperatury od 950 do 1100 °C. W przypadku gatunków niestabilizowanych istnieje ryzyko wydzielenia się węglików chromu na granicach ziaren podczas chłodzenia, co prowadzi do znaczne-

go obniżenia odporności korozyjnej. W celu przeciwdziałania temu zjawisku, po procesie formowania konieczne jest wyżarzanie stali w temperaturze między 750 a 850 °C, z chłodzeniem w wodzie lub na powietrzu.

Formowanie na gorąco austenityczno - ferrytycznych stali nierdzewnych

Stale tej grupy należy obrabiać plastycznie na gorąco poniżej temperatury 950 °C wraz z szybkim chłodzeniem po procesie formowania. W

innym przypadku należy wykonać wyżarzanie w zakresie temperatury od 1100 do 1500 °C z następnym szybkim chłodzeniem.

Zdjęcie 8: Kształtowniki wyciskane na gorąco zastosowane w konstrukcji ze stali i szkła "La lentille de la cour de Rome" - Paryż (F)



Gięcie rur na gorąco

Większość operacji gięcia rur wykonuje się w temperaturze pokojowej, jednak w pewnych szczególnych przypadkach można zastoso-

Rury z austenitycznych stali nierdzewnych

Jak już wspomniano w części poświęconej „Formowaniu na gorąco austenitycznych stali nierdzewnych” gięcie musi być wykonywane w zakresie temperatury od 950 do 1300 °C, a zastosowanie odpowiednio szybkiego nagrzewania i chłodzenia umożliwia zmniejszenie do minimum ryzyka wystąpienia wydzie-

Rury z ferrytycznych stali nierdzewnych

Gięcie należy wykonywać w zakresie temperatury od 850 do 1100 °C, zgodnie z zaleceniami podanymi w części „Formowanie na gorąco ferrytycznych stali nierdzewnych”. Tak jak w

Operacje wykańczające

Po zakończeniu operacji gięcia rur na gorąco i schłodzeniu do temperatury pokojowej usuwa się kołnierze zamykające końce rury i piasek z wnętrza, a następnie wykonuje proces trawienia i pasywacji całości elementu – wewnątrz i na zewnątrz. W przypadku rur przeznaczonych

wać gięcie na gorąco. Operację gięcia na gorąco można wykonać zgodnie z następującą procedurą. Jeden z końców formowanej rury zostaje hermetycznie zespawany z kołnierzem, po czym rurę umieszcza się w pozycji pionowej i zasypuje suchym piaskiem o ziarnistości około 100µm (lub 150 mesh) i dokładnie ubija podczas operacji zasypywania. Gdy rura zostaje całkowicie wypełniona piaskiem, górny otwór zamyka się również spawając z kolejnym kołnierzem. Tak przygotowana rura może być podgrzana do odpowiedniej temperatury formowania i następnie gięta do uzyskania wymaganego kształtu.

leń węglików w temperaturze 500-900 °C. Tak wykonana obróbka nie wymaga zastosowania kolejnego wyżarzania z szybkim chłodzeniem. Jeżeli ogrzewanie formowanych elementów wykonywane jest palnikiem, to należy zwrócić uwagę na jego własności redukcyjne lub nawęglające i stosować gaz lekko utleniający.

przypadku stali o strukturze austenitycznej, do ogrzewania palnikiem należy stosować gaz o charakterze lekko utleniającym.

do transportu cieczy, obróbka wewnętrznej powierzchni jest bezwzględnie wymagana. Dla rur przeznaczonych na elementy dekoracyjne, po trawieniu powierzchni dodatkowo wykonuje się polerowanie środkiem ściernym o odpowiedniej wielkości ziaren.

3 Technologie łączenia

3.1 Spawanie

Struktura stali nierdzewnych bezpośrednio po spawaniu jest głównie uzależniona od stężenia poszczególnych pierwiastków stopowych. Pierwiastki te można podzielić na dwie grupy o przeciwnym oddziaływaniu:

- stabilizujące fazę austenityczną – nikiel, węgiel, mangan, kobalt, miedź,
- stabilizujące fazę ferrytyczną – chrom, molibden, krzem, niob, tytan, aluminium.

Łączny wpływ poszczególnych pierwiastków na strukturę stali nierdzewnych po spawaniu można wyznaczyć stosując wykresy budowane w układzie równoważnik chromu i równoważnik niklu, które na podstawie stężeń danych pierwiastków określają obszary występowania poszczególnych faz. Najbardziej znanym wykresem takiego typu jest wykres Schaeffler'a (1949), oraz jego ulepszone wersje: wykres De Long'a (1973) i Welding Research Council - WRC (1992).

Stale nierdzewne w zależności od struktury po spawaniu wykazują różne własności:

- Stale nierdzewne o strukturze austenitycznej, zawierające często

wysokie stężenie niklu, są nieodporne na zjawisko pęknięcia na gorąco w trakcie krzepnięcia, które występuje podczas chłodzenia z temperatury powyżej 1250 °C.

- Stale nierdzewne o strukturze ferrytycznej są szczególnie narażone na rozrost ziarna w temperaturze powyżej 1150 °C, co powoduje niską udatność i ciągliwość stali.
- Stale nierdzewne o strukturze martenzytycznej są podatne na zjawiska pęknięcia wodorowego i pęknięcia na zimno, które powstają podczas chłodzenia z temperatury poniżej 400 °C i występują zazwyczaj w czasie od kilku godzin do kilku dni po operacji spawania.

W tablicy 3.3.1 zestawiono zmiany strukturalne zachodzące podczas procesu spawania w różnych gatunkach stali nierdzewnych wraz z zalecanymi środkami ostrożności.



*Zdjęcie 9: Ręczne
spawanie metodą GTAW*

Typ stali nierdzewnej	Główne własności po spawaniu i zalecane środki ostrożności
Martenzytyczne 10,5-13% Cr 0,2-0,5% C	<ul style="list-style-type: none"> • Podatne na pękanie na zimno, w zależności od zawartości węgla i wodoru oraz poziomu naprężeń szczytkowych, w temperaturze poniżej 400 °C. Dodatkowe zalecenia: <ul style="list-style-type: none"> – zwykle wymagane jest wstępne podgrzewanie do 200-300 °C, – stosować materiały dodatkowe o niskiej zawartości wodoru, – wygrzewać po spawaniu w około 300 °C. • Wysoka wytrzymałość na rozciąganie i twardość. • Dobra udarność, szczególnie w przypadku gatunków niskowęglowych.
Półferrytyczne 17% Cr 0,04% C	<ul style="list-style-type: none"> • Podatne na kruchość przez rozrost ziaren powyżej 1150 °C (zalecane podgrzewanie). • Niska udarność i ciągliwość. • Wrażliwe na korozję międzykrystaliczną szczególnie w strefie wpływu ciepła (SWC). • Wygrzewanie po spawaniu w temperaturze około 800 °C przywraca własności mechaniczne i odporność na korozję międzykrystaliczną.
Ferrytyczne 17-30% Cr 0,02% C stabilizowane: Ti, Nb	<ul style="list-style-type: none"> • Podatne na kruchość przez rozrost ziaren powyżej 1150 °C (zalecane podgrzewanie) • Podatne na tzw. «kruchość 475 °C» (zakres temperatury 350-550 °C), która może być zniwelowana przez wyżarzanie • Zadowalająca ciągliwość oraz polepszona udarność w porównaniu z gatunkami półferrytycznymi. • Niewrażliwe na korozję międzykrystaliczną.
Austenityczne 18% Cr-8% Ni 0,05% C	<ul style="list-style-type: none"> – <i>Struktury w pełni austenityczne:</i> <ul style="list-style-type: none"> • Podatne na gorące pękanie w trakcie krzepnięcia. • Dobra odporność na korozję międzykrystaliczną w przypadku gatunków stabilizowanych i niskowęglowych. • Doskonała udarność i ciągliwość. – <i>Struktury zawierające kilka procent ferrytu:</i> <ul style="list-style-type: none"> • Niepodatne na gorące pękanie. • Dobra odporność na korozję międzykrystaliczną w przypadku gatunków stabilizowanych i niskowęglowych. • W produktach o dużej grubości może wystąpić wzrost kruchości w wyniku długotrwałego wygrzewania w zakresie temperatury od 550 °C do 900 °C spowodowany wydzieleniem twardej międzymetalicznej fazy sigma. Wpływ temperatury i czasu jej oddziaływania można opisać następująco: 1000 godzin w temperaturze 650 °C w przybliżeniu odpowiada 10 godzinom w 750 °C. • Doskonała udarność i ciągliwość.
Austenityczno-ferrytyczne typu duplex 22% Cr-5% Ni 3% Mo-0,02% C	<ul style="list-style-type: none"> – <i>Struktury dwufazowe austenityczno-ferrytyczne typu duplex:</i> <ul style="list-style-type: none"> • Niepodatne na gorące pękanie. • Doskonała udarność i dobra ciągliwość w zakresie temperatury od – 40 °C do + 275 °C. • Podatne na wzrost kruchości w wyniku obecności fazy sigma, gdy poddane oddziaływaniu temperatury między 500 °C a 900 °C.

Tablica 3.1.1 -
 Charakterystyka
 spawania i zalecane
 środki ostrożności dla
 różnych gatunków stali
 nierdzewnych.

Metody spawania

Istnieje szeroka grupa metod spawania, jakie można zastosować dla stali nierdzewnych, ale tylko nieliczne z nich zapewniają uzyska-

nie odpowiednich własności tego materiału. Zalecane metody spawania przedstawiono w tablicy 3.1.2

Tablica 3.1.2 - Główne metody spawania i zgrzewania stosowane dla stali nierdzewnych.

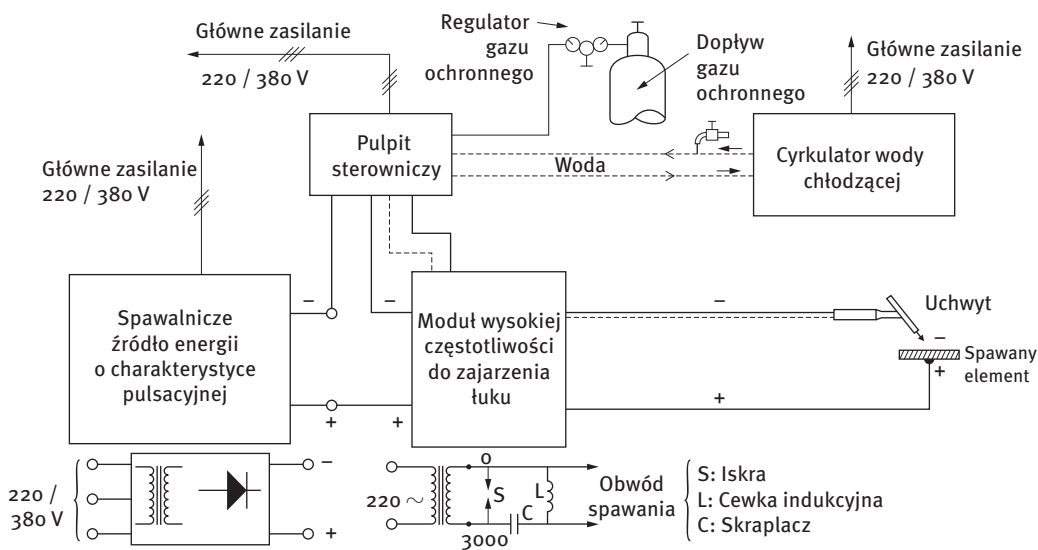
Metody elektrycznego spawania łukowego	Metody rezystancyjne i indukcyjne	Metody stosujące energię promieniowania
<ul style="list-style-type: none"> • Metody z zastosowaniem elektrody z metalu trudno topliwego: <ul style="list-style-type: none"> – GTAW, TIG, WIG – PAW (plazma) • Metody spawania elektrodą topliwą: <ul style="list-style-type: none"> – GMAW lub MIG – SMAW (spawanie elektrodą otuloną) – SAW (spawanie łukiem krytym) – FCAW (spawanie elektrodą rdzeniową) 	<ul style="list-style-type: none"> • Metody nagrzewania rezystancyjnego (oporowego): <ul style="list-style-type: none"> – zgrzewanie punktowe – zgrzewanie liniowe – zgrzewanie garbowe • Zgrzewanie iskrowe • Zgrzewanie indukcyjne prądami wysokiej (HF) lub średniej (MF) częstotliwości (wzdłużne spawanie rur) 	<ul style="list-style-type: none"> • Spawanie laserowe • Spawanie wiązką elektronów

Spawanie łukowe

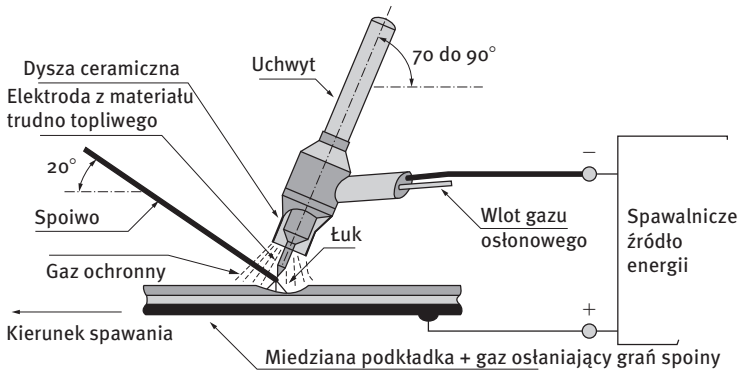
Spawanie łukowe elektrodą wolframową w osłonie gazu obojętnego (GTAW)

Metoda spawania GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) znana jest również jako metoda TIG

(Tungsten Inert Gas – spawanie łukowe elektrodą wolframową w osłonie gazów obojętnych) lub



Rys. 3.1.1 - Zasada działania urządzenia spawalniczego metodą GTAW lub TIG.



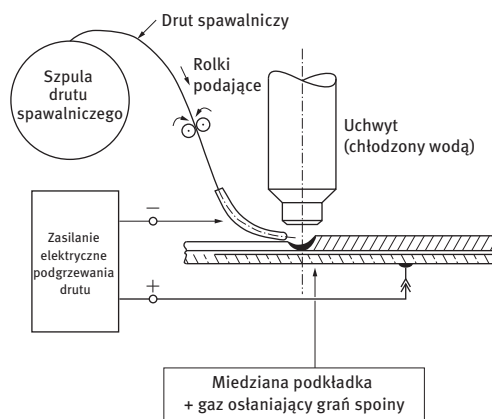
Rys. 3.1.2 - Przykład spawania ręcznego metodą GTAW (TIG).

WIG (Wolfram Inert Gas). W metodzie tej energia niezbędna do stopienia metalu jest dostarczana przez łuk elektryczny zajarzony i utrzymywany między elektrodą wolframową lub ze stopu wolframowego i elementem spawanym, w atmosferze gazu obojętnego lub lekko redukującego. Stale nierdzewne spawa się zawsze prądem stałym przy biegunowości ujemnej (DCEN lub DCSP). W tych warunkach, strumień elektronów uderza w spawany element, co zwiększa wtopienie, podczas gdy elektroda, wykonana zazwyczaj z wolframu torowanego (2% ThO₂) ulega bardzo małemu zużyciu. Spawanie wykonuje się zarówno ręcznie jak i automatycznie. Jeżeli stosuje się spoiwo (metal dodatkowy), to jest ono aplikowane w postaci gołych prętów (rys. 3.1.2) lub drutu w kręgach (rys. 3.1.3) do spawania automatycznego. Przepływ gazu obojętnego, chroniącego strefę łuku od otaczającego powietrza, umożliwia utrzymanie bardzo stabilnego łuku.

Główne zalety stosowania tej metody do spawania stali nierdzewnych są następujące:

- skoncentrowane źródło ciepła powodujące powstanie wąskiej strefy stopienia,
- bardzo stabilny łuk i spokojne, niewielkie jezioro spawalnicze,
- doskonała jakość połączeń, solidne i pozbawione porowatości spoiny,
- bardzo małe zużycie elektrod,
- łatwość opanowania techniki spawania.

Elementem aktywnym uchwytu do spawania łukowego jest elektroda z materiału trudno topliwego, najczęściej wykonana z torowanego wolframu (1-3% ThO₂), która ułatwia zajarzenie łuku i obniża ryzyko powstania zanieczyszczeń. Podczas spawania prądem stałym przy biegunowości ujemnej (DCEN) należy dobrać odpowiednią średnicę elektrody w zależności od zastosowanego prądu spawania, zgodnie z tabelicą 3.1.3.



Rys. 3.1.3 - Przykład spawania automatycznego metodą GTAW. Spoiwo może, być podawane zarówno jako zimne lub podgrzane przez pomocnicze źródło prądu.

Prąd spawania – DCEN (A)	Średnica elektrody (mm)
25 – 70	1,0
60 – 150	1,6
100 – 200	2,0
200 – 350	3,0
350 – 500	4,0
500 – 800	5,0

Tablica 3.1.3 - Średnica elektrody z materiału trudno topliwego w charakterze prądu spawania.

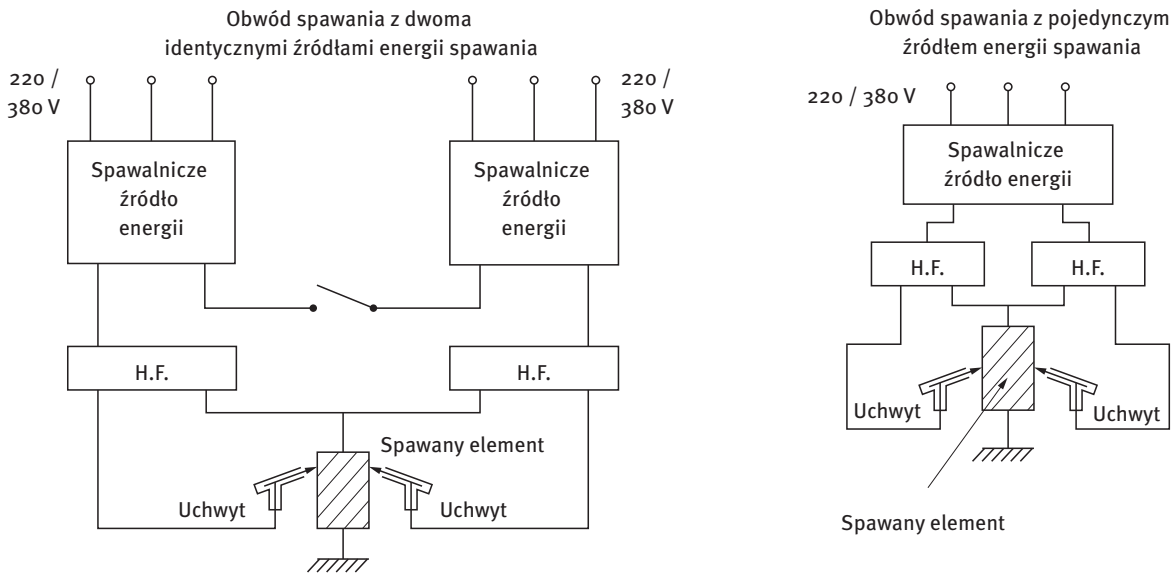
W normie ISO 14175 określono dobór gazów ochronnych do spawania wg klasyfikacji A 81-010. Do spawania ręcznego, jako gazu ochronnego zazwyczaj stosuje się czysty argon, ale w szczególnych przypadkach można również stosować mieszaniny argonowo-helowe lub argonowo-wodorowe. Argonowo-tlenowe mieszaniny gazów ochronnych nie są zalecane w tym przypadku, ponieważ przyczyniają się do szybkiego zużycia elektrod trudnotopliwych. Argonowo-helowe mieszaniny gazów zapewniają kompromis między stabilnością łuku i łatwością jego zajarzenia uzyskiwaną dzięki argonowi oraz dobrej penetracji, wysoką prędkością spawania i prawidłową strukturą wywołaną przez hel. Mieszaniny tego typu można z powodzeniem stosować dla austenitycznych, ferrytycznych i martenzytycznych stali nierdzewnych. Argonowo-helowe mieszaniny gazów ochronnych (R1 lub R2) są powszechnie stosowane do spawania austenitycznych stali nierdzewnych, zarówno w metodzie spawania ręcznego jak i automatycznego. Mieszanina 95% Ar-5% H₂ jest często używana w metodzie automatycznego spawania stali austenitycznych, ponieważ poprawia penetrację i zmniejsza szerokość spoiny oraz znacznie zwiększa prędkość spawania (do 50% w porównaniu do czystego argonu). W przypadku zastosowania mieszanin argonowo-wodorowych ryzyko powstawania podtopień w spoinie jest mniejsze niż dla mieszanin argonowo-helowych. Jednak, argonowo-wodorowych mieszanin gazów ochronnych nie można stosować do spawania stali ferrytycznych, martenzytycznych lub ferrytyczno-austenitycznych typu duplex, z powodu zagrożenia kruchością wodorową złączy spawanych. Do spawania stali ferrytyczno-austenitycznych typu duplex bez spoiwa (metal dodatkowego) często stosuje się mieszaniny argonowo-azotowe, w celu

zachowania właściwej równowagi między fazą austenityczną i ferrytyczną w spoinie, ponieważ azot jest pierwiastkiem silnie stabilizującym austenit.

Gazem pomocniczym chroniącym grań spoiny jest zazwyczaj argon, ale czasem stosuje się także azot w przypadku stali ferrytyczno-austenitycznych typu duplex lub stali austenitycznych, kiedy zmierza się do ograniczenia udziału ferrytu w grani spoiny. Jednak, zastosowanie azotu, tak jak i wodoru, jest niedopuszczalne dla stali nierdzewnych o strukturze ferrytycznej i martenzytycznej. W przypadku elementów spawanych termin „stale nierdzewne” jest często jednoznacznie przypisywany jedynie dla austenitycznych stali nierdzewnych. Należy pamiętać, że gatunki stali ferrytycznych, dwufazowych typu duplex a nawet martenzytycznych można również spawać, choć stosując odmienne procedury i parametry spawania. W szczególności zastosowanie stabilizowanych tytanem i niobem gatunków stali ferrytycznych umożliwia otrzymanie spoin o wysokiej jakości, oczywiście przy zachowaniu odpowiednich środków ostrożności podczas użycia wodoru i azotu.

Jeżeli stosuje się spoiwo, to jest ono aplikowane w postaci gołych drutów w metodzie spawania ręcznego lub drutu w kręgach do spawania automatycznego.

Spawanie metodą TIG dzięki bardzo niewielkiemu zużyciu się elektrody i wysokiej stabilności łuku często odbywa się metodą automatyczną. Głównym problemem w automatyzacji tego procesu jest utrzymanie stałej długości łuku podczas posuwu wzdłużnego na całej długości złącza. W każdym z przypadków konieczne jest odpowiednie przygotowanie krawędzi łączonych powierzchni i zagwarantowanie regularnego doprowadzania drutu spawalniczego.



Rys. 3.1.4 - Zasada jednoczesnego dwustronnego spawania metodą TIG – Dwóch operatorów spawa jednocześnie w jednym jeziorce po obu stronach.

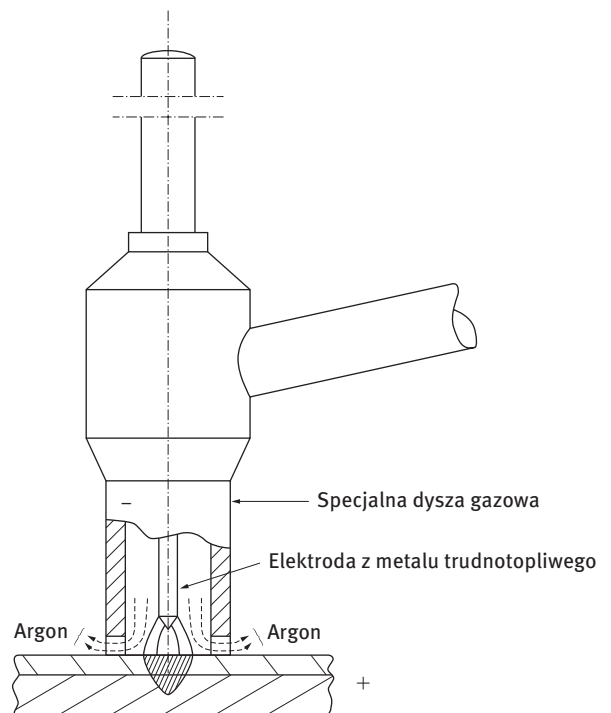
Dla blach o grubości między 1,5 a 15mm często stosuje się metodę spawania ręcznego w pozycji pionowej złącza doczołowych (rys. 3.1.4). W tym przypadku jeziorko spawalnicze jest dobrze chronione przed wpływem atmosfery zewnętrznej, ponieważ obie strony złącza są w kontakcie z gazem ochronnym.

stosowane w przypadku austenitycznych stali nierdzewnych.

Metoda TIG jest także często stosowana do wykonywania zgrzein punktowych (rys. 3.1.5). Zgrzewanie punktowe uzyskuje się przez przyłożenie łuku w danym miejscu i utrzymanie go przez wymaganą długość czasu. W tym przypadku uchwyt elektrody wyposażony jest w specjalną dyszę gazową, która umożliwia swobodny wylot gazów z obszaru oddziaływania łuku. Podczas zgrzewania punktowego górna blacha łączonych elementów musi być na tyle cienka, aby umożliwić łatwą penetrację przez łuk spawalniczy i zazwyczaj jej grubość wynosi od 0,5 do 1,5mm. W tym przypadku jako gaz osłonowy można zastosować czysty argon, a jeżeli wymagana jest większa głębokość penetracji łuku, mieszaniny argonowo- helowe. Mieszaniny argonowo-tlenowe są wyłącznie

Metoda spawania TIG z zastosowaniem aktywowującego topnika (A-TIG) lub metoda GTA z udziałem topnika to nowa odmiana metody GTAW, w której na powierzchnie łączonych

Rys. 3.1.5 - Zasada zgrzewania punktowego z zastosowaniem metody TIG.

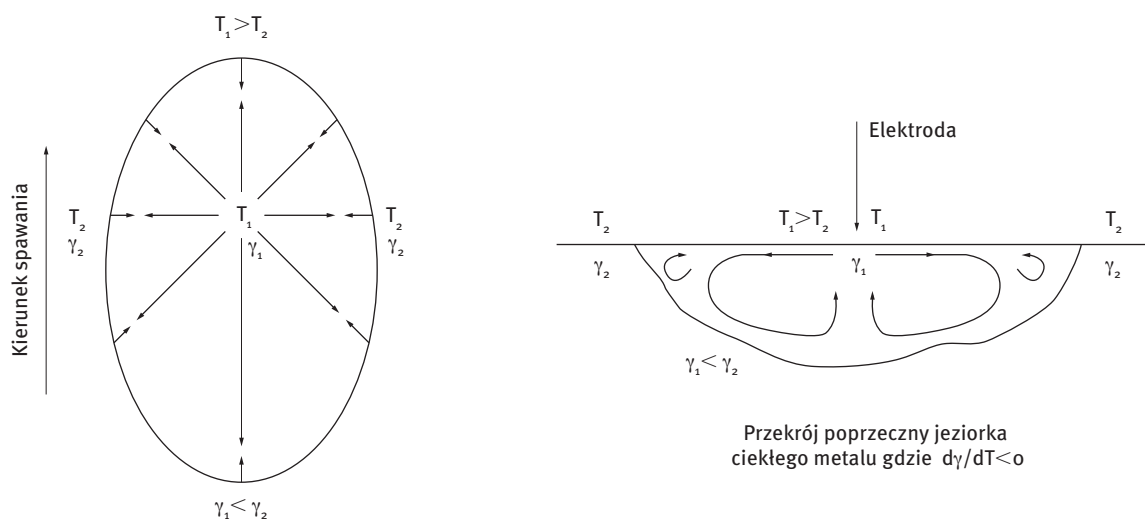


elementów nanosi się cienką warstwę topnika aktywującego w formie pasty. Ma to za zadanie zwiększenie jakości i wydajności procesu GTA. Główną zaletą jest tu zwiększenie głębokości wtopienia nawet trzykrotnie. Metoda ta została po raz pierwszy zastosowana w latach 1960 przez „E.O. Paton Electric Welding Institute” na Ukrainie.

Działanie aktywującego topnika polega na jego oddziaływaniu na gradient napięcia powierzchniowego $d\gamma$, ciekłego jeziora podczas spawania. Zazwyczaj, w przypadku wielu stopów, gradient napięcia powierzchniowego

zmniejsza się ze wzrostem temperatury (T), co znaczy $d\gamma/dT < 0$ i stopiony metal płynie z obszaru o niskim napięciu powierzchniowym do miejsc o wyższym napięciu powierzchniowym ($\gamma_2 > \gamma_1$).

Wyższa temperatura T_1 na środku jeziora ciekłego metalu powoduje, że napięcie powierzchniowe γ_1 na środku jest mniejsze niż γ_2 w strefie zewnętrznej jeziora. W wyniku tego metal płynie zgodnie z ruchem jak na rysunku 3.1.6, a otrzymana spoina jest relatywnie płytka i szeroka.



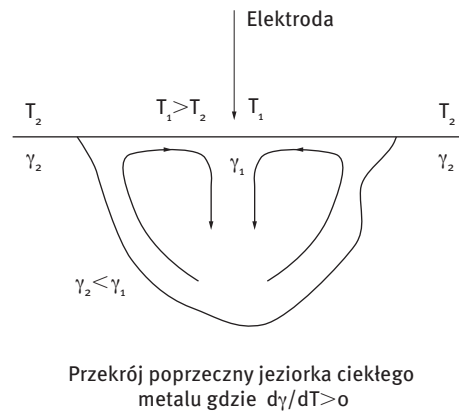
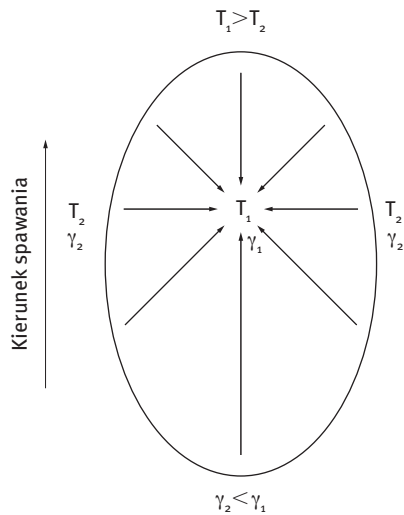
Rys. 3.1.6 - Przepływ metalu na i pod powierzchnią jeziora spawalniczego – ujemny współczynnik temperaturowy napięcia powierzchniowego

Niektóre powierzchniowo czynne pierwiastki chemiczne takie jak siarka (S) mogą zmienić kierunek przepływu ciekłego metalu w jeziorce. Dla odpowiednio wysokiego stężenia siarki (powyżej 0,007%) następuje zmiana zależności na $d\gamma/dT > 0$ i metal płynie tak jak pokazano na rysunku 3.1.7, a uzyskane przetopienie daje głęboką i wąską spoinę.

Jeżeli w jeziorce spawalniczym występuje gradient – lokalną zmianą napięcia powierzchniowego (efekt Marangoniego) jak

pokazano na rysunku 3.1.7, prąd konwekcyjny jest skierowany w dół jeziora powodując głębokie przetopienie. W innym przypadku, przetopienie można zwiększyć praktycznie trzykrotnie przez zastosowanie aktywującego topnika.

Aktywujące topniki są łatwe w nanoszeniu na powierzchnie łączonych elementów. Można je stosować podczas spawania metodą GTA bez materiału dodatkowego (spoiwa) dla cienkich elementów w celu zmniejszenia wpływu odkształceń spawalniczych, głównie

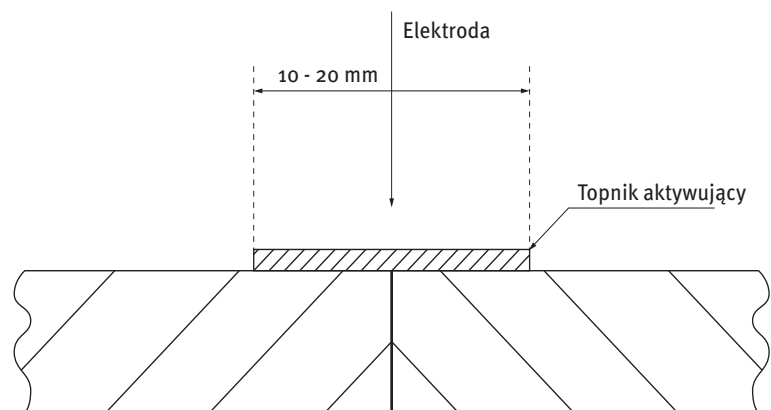


Przekrój poprzeczny jeziora ciekłego metalu gdzie $d\gamma/dT > 0$

Rys. 3.1.7 - Przepływ metalu na i pod powierzchnią jeziora spawalniczego – dodatni współczynnik temperaturowy napięcia powierzchniowego

dla elementów do grubości rzędu 5mm – przy spoinach czołowych – co zapewnia pełne przetopienie w jednym przejściu. Aktywujący topnik w postaci pasty jest наносzony na łączone elementy za pomocą szczotki (rysunek 3.1.8), gdzie wysycha w bardzo krótkim czasie. Tak przygotowany element jest gotowy do spawania konwen-

cyjonalną metodą GTA. Podczas spawania w kilku przejściach zaleca się usunięcie z powierzchni resztek stopionego topnika z poprzedniego spawania za pomocą szczotki ze stali nierdzewnej.



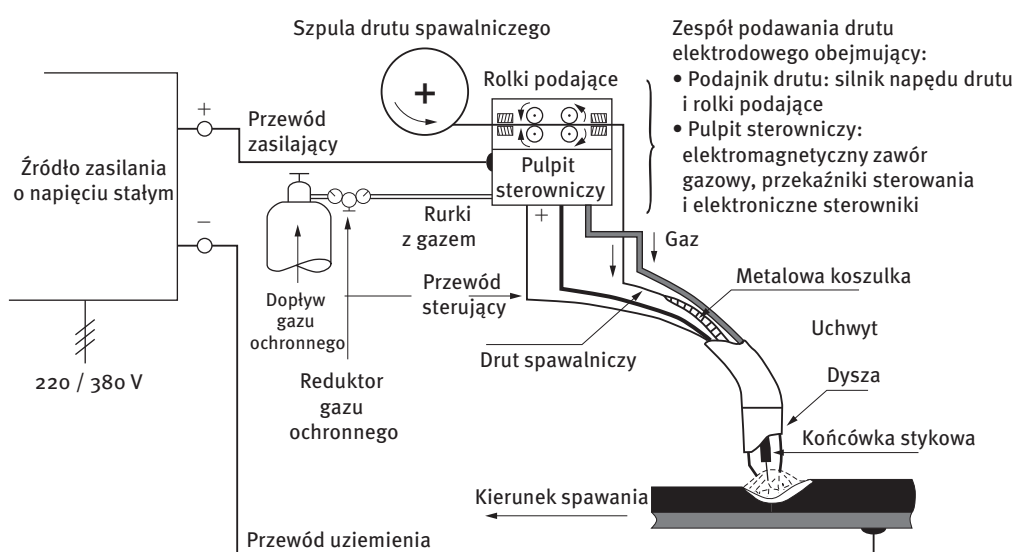
Rys. 3.1.8 - Przekrój poprzeczny złącza

Spawanie łukowe elektrodą metalową w osłonie gazu (GMAW)

Na rysunku 3.1.9 przedstawiono metodę spawania GMAW (Gas Metal Arc Welding), znaną również jako metoda MIG (Metal Inert Gas – spawanie elektrodą topliwą w osłonie gazu obojętnego). W przeciwieństwie do metody

GTAW, elektroda zużywa się w trakcie procesu, a łuk jarzy się w osłonie gazu ochronnego pomiędzy topliwym drutem spawalniczym i elementem spawanym. Podstawowe cechy tej metody to:

Rys. 3.1.9 - Zasada spawania łukowego elektrodą metalową w osłonie gazu – GMAW (MIG)



- zastosowanie bardzo dużej gęstości prądu w drucie elektrodowym ($> 90 \text{ A/mm}^2$), około 10 razy większej niż w metodzie spawania elektrodą otuloną (SMAW),
- szybkie topienie się drutu elektrodowego (prędkość topienia wynosi około 8 m/min) z powodu wysokiej temperatury łuku wymaga stosowania automatycznego podawania drutu ze szpuli o ciężarze 12 kg,
- stale nierdzewne spawa się zawsze prądem stałym przy biegunowości dodatniej (DCEP lub DCRP); biegun dodatni generatora podłączony jest do elektrody,
- uchwyt spawalniczy jest zazwyczaj trzymany w ręku (tak zwana metoda „półautomatyczna”), jednak przy wysokiej mocy spawania jest zamocowany do wózka (metoda „automatyczna”).

Mechanizm przenoszenia metalu w łuku jest istotnym parametrem procesu i z tego względu wyróżnia się jego trzy zasadnicze rodzaje (rys. 3.1.10):

- Sposób spawania łukiem krótkim lub ze zwarciovym przenoszeniem metalu, w którym metal topi się tworząc duże krople o średnicy często większej niż średnica drutu elektrodowego. Gdy na końcu elektrody tworzy się kropla, styka się ona z jeziorkiem spawalniczym i tworzy zwarcie z nagłym wzrostem prądu. Napięcie powierzchniowe powoduje efekt ściśnięcia, który oddziela kroplę od elektrody. Częstotliwość tego zjawiska wynosi od 20 Hz do 100 Hz, co odpowiada czasowi cyklu od 0,01 s do 0,05 s.

- Sposób przenoszenia kropłowego lub grawitacyjnego. W tym przypadku, topienie odbywa się w postaci dużych kropli, które odrywają się, gdy ich ciężar jest wystarczający dla pokonania sił napięcia powierzchniowego i z powodu większej długości łuku spadają swobodnie zanim zetkną się z jeziorkiem spawalniczym.
- Sposób przenoszenia natryskowego obejmuje gęstość prądu powyżej poziomu przejścia, rzędu 200 A/mm². Elektroda topi się emitując strumień małych kropelek. Gdy gęstość prądu dalej się zwiększa, koniec elektrody staje się stożkowy i strumień jeszcze mniejszych kropelek uwalnia się osiowo.

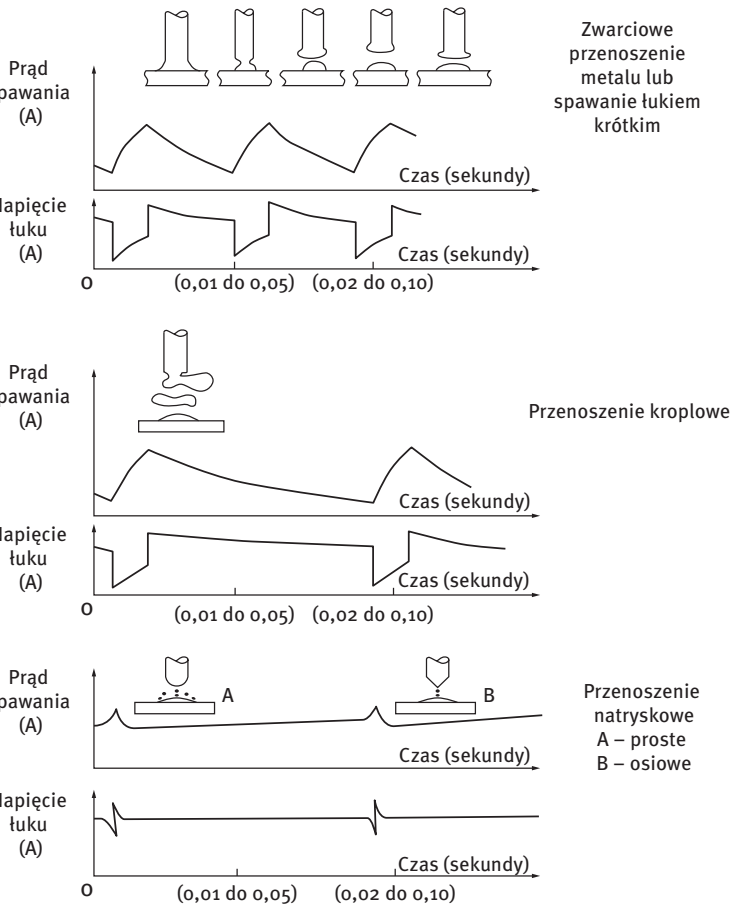
W normie ISO 14175 określono dobór gazów ochronnych do spawania wg klasyfikacji A 81-010. Mogą to być mieszaniny gazów o charakterze neutralnym, lekko redukującym jak i lekko utleniającym. Poniżej omówiono główne mieszaniny stosowanych gazów ochronnych:

Mieszaniny argonowo-tlenowe (M13)

Wprowadzenie do mieszaniny gazów bardzo niewielkiego stężenia tlenu pozwala znacznie obniżyć napięcie powierzchniowe ciekłego metalu i zwiększyć stabilność łuku. Ścieg spoiny wykazuje wtedy lepszą zwilżalność i jednocześnie spada ryzyko występowania podtopień. Pomimo tego oddziaływanie tlenu jest najbardziej efektywne podczas natryskowego przenoszenia metalu. W praktyce stężenie tlenu w mieszaninach argonowo-tlenowych jest ograniczone do 2% bez względu na typ spawanej stali nierdzewnej.

Mieszaniny argon- CO₂ (M12)

Wpływ CO₂ na transport masy w procesie spawalniczym jest podobny do oddziaływania tle-



Rys. 3.1.10 – Mechanizmy przenoszenia metalu w łuku podczas spawania metodą MIG.

nu, ale przez to, że potencjał utleniający jest znacznie niższy to utlenianie ściegu spoiny jest silnie zredukowane. W praktyce stężenie CO₂ jest ograniczone do 3%, co stanowi dopuszczalną graniczną wartość dla stali nierdzewnych o strukturze ferrytycznej.

Mieszaniny CO₂-H₂ (M11)

Mieszaniny gazów ochronnych o składzie 95-96% Ar, 3% CO₂, 1-2% H₂ zapewniają doskonałą stabilność łuku przy spawaniu łukiem krótkim, a dodatek CO₂ nie przyczynia się do znacznego nawęglenia jeziorka spawalniczego. Stężenie wodoru w tych

mieszaninach gazów ochronnych jest na tyle wysokie, że nie zaleca się ich stosować dla gatunków stali ferrytycznych bez obróbki cieplnej po spawaniu.

Mieszanki helowo-tlenowe i argonowo-helowo-CO₂

Mieszanki te stanowią kolejną modyfikację mieszanin argonowo-tlenowych i argonowo-CO₂. Przyczyniają się do zwiększenia płynności jeziora spawalniczego, polepszenia profilu spoiny oraz uzyskania pozbawionej wad i bardziej zwartej spoiny. Jeżeli stężenie tlenu i CO₂ nie przekracza odpowiednio 2 i 3% to można je stosować do spawania ferrytycznych stali nierdzewnych.

Mieszanki argonowo-tlenowo-azotowe i argonowo-CO₂-azotowe

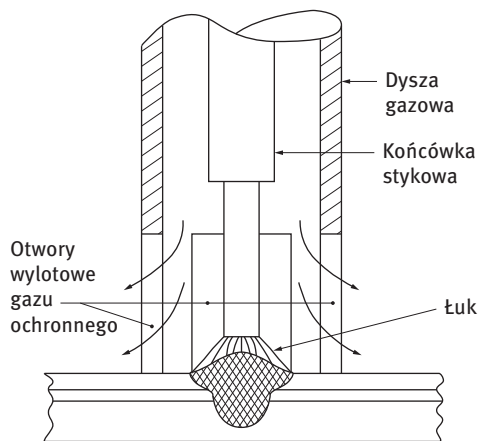
Podczas spawania stali austenicznych i ferrytyczno-austenicznych typu duplex zawierających azot, do gazu ochronnego można wprowadzić dodatek azotu, co zmniejszy straty tego pierwiastka w stopionym metalu podczas spawania. W przypadku spawania stali typu duplex dodatek azotu odgrywa decydujące znaczenie w uzyskaniu prawidłowej równowagi fazowej w spoinie między ferrytem i austenitem.

W tabelicy 3.1.4 przedstawiono zalecane parametry spawania metodą MIG elektrodą stałą (druć spawalniczą) w mieszaninie gazów

ochronnych argon-tlen lub argon-CO₂ dla austenicznej stali nierdzewnej.

Zarówno w metodzie TIG jak i metodzie MIG ze zwarciovym przenoszeniem metalu stosuje się uchwyt elektrody wyposażony w specjalną dyszę wylotową (rys. 3.1.11) i oprzyrządowanie do synchronizacji, co umożliwia regulację czasu oddziaływania łuku spawalniczego (od 0,5 do 5 sekund).

Do spawania metodą GMAW w pulsacyjnym trybie pracy można stosować kilka typów źródeł prądu spawania: inwertery i tranzystorowe źródła zasilania o stabilizowanym napięciu, które oferują niezależne ustawienia parametrów prądowych. Bardziej wyrafinowane źródła zasilania umożliwiają synergiczną kontrolę wstępnie zaprogramowanych parametrów prądowych w zależności od prędkości podawania



Rys. 3.1.11 – Zgrzewanie punktowe metodą GMAW.

Tablica 3.1.4 - Zalecane parametry spawania austenicznych stali nierdzewnych metodą MIG.

Średnica drutu spawalniczego (mm)	Prąd spawania (A)		Napięcie łuku (V)		Natężenie przepływu Ar-O ₂ lub Ar-CO ₂ (l/min.)
	Zwarciove przenoszenie metalu	Przenoszenie natryskowe	Zwarciove przenoszenie metalu	Przenoszenie natryskowe	
0,8	60 – 80	140 – 210	15 – 17	25 – 28	15
1,0	80 – 120	180 – 250	16 – 18	26 – 29	20
1,2	120 – 150	220 – 290	17 – 20	27 – 30	25

drutu, co umożliwia optymalne ustawienie zależności między prądem tła i prądem piku co jest specjalnie przydatne podczas spawania w pozycji pionowej w górę i pozycji pułapowej.

Jednym z ostatnich udoskonaleń tej metody jest proces (STT) „Surface Tension Transfer” – przenoszenie siłami napięcia powierzchniowego, w którym możliwość regulacji prądu tła i prądu piku zapewnia bardzo stabilny łuk podczas spawania. Prąd jest nastawiany w przeciągu kilku milisekund, co powoduje kolosalne zmniejszenie rozbrzygów metalu (jakość spoiny) i ograniczenie powstawania dymów (bezpieczeństwo pracy). Jednym z głównych zastosowań tego procesu jest wykonywanie ściągów graniowych cienkich rur, a także ogólniej - spoin doczołowych i pułapowych w pozycji pionowej w górę oraz połączeń rurowych.

Metoda spawania łukowego drutem proszkowym z rdzeniem topnikowym (Flux Cored Arc Welding – FCAW) stanowi odmianę metody spawania MIG. Jest to metoda, w której drut spawalniczy składa się z metalowej powłoki ze stali nierdzewnej wypełnionej stałym topnikiem (rys. 3.1.12), którego rola jest podobna do roli otuliny elektrody w metodzie spawania ręcznego SMAW. Z uwagi na możliwość ciągłego podawania drutu spawalniczego metoda FCAW łączy zalety metody SMAW z wysoką wydajnością procesu automatycznego lub półautomatycznego. W porównaniu z konwencjonalną litą elektrodą, topnik zapewnia pokrycie żużlowe i podnosi wydajność. W wypadku prądu powyżej 200 A, współczynnik stapienia wynosi około 100 g/min dla drutu litego o średnicy 1,6 mm zawierającego 20% Cr i 10% Ni, w porównaniu do około 170 g/min w wypadku drutu proszkowego o tej samej średnicy. Tak duża różnica wynika z faktu, że w drucie proszkowym elektryczność przewodzi tylko metalowa powłoka,

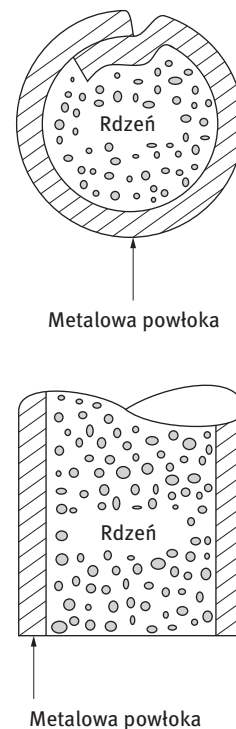
ponieważ rdzeń złożony z mieszaniny proszków metalowych i mineralnych, prawdopodobnie związanych w alkaliczny krzemian, ma wysoką oporność elektryczną.

Jeżeli przyjąć, że A to pole przekroju metalowej osłony elektrody, L odległość wystającego drutu między końcówką stykową a elementem spawanym, I prąd spawania to współczynnik stapienia metalu M wyrażony w g/min można przedstawić następującym równaniem:

$M = K_1 + K_2 I + K_3 L^2 / A$ gdzie K_1 , K_2 i K_3 są współczynnikami proporcjonalności.

Uwaga: Metoda GMAW jest często określaną jako spawanie MIG. Metody spawania MIG i MAG są często niewłaściwie rozumiane. W rzeczywistości, w metodzie MIG utleniający charakter gazu ochronnego jest nieznaczny, natomiast jest on wyraźnie zwiększony w metodzie MAG. Z tej przyczyny do spawania stali nierdzewnych stosuje się metodę MIG, podczas gdy metodę MAG stosuje się do spawania stali węglowej.

Proces GMAW/MIG wymaga często niewielkiego dodatku tlenu (O_2) lub dwutlenku węgla (CO_2) do gazu ochronnego (argon – Ar) dla polepszenia zarówno stabilności łuku jak i zwilżalności ciekłego metalu. Typowo wprowadza się stężenie 2% O_2 lub 3% CO_2 . Wyższe stężenia O_2 lub CO_2 powodują nadmierne utlenianie chromu (Cr), manganu (Mn) i krzemu (Si) oraz nadmierny wzrost stężenia węgla (% C) w metalu spoiny, które wynosi 0,0025% dla gazu ochronnego zawierającego 2% CO_2 i może osiągnąć 0,04% dla 4% CO_2 .



Rys. 3.1.12 - Przykład drutu proszkowego z rdzeniem topnikowym.

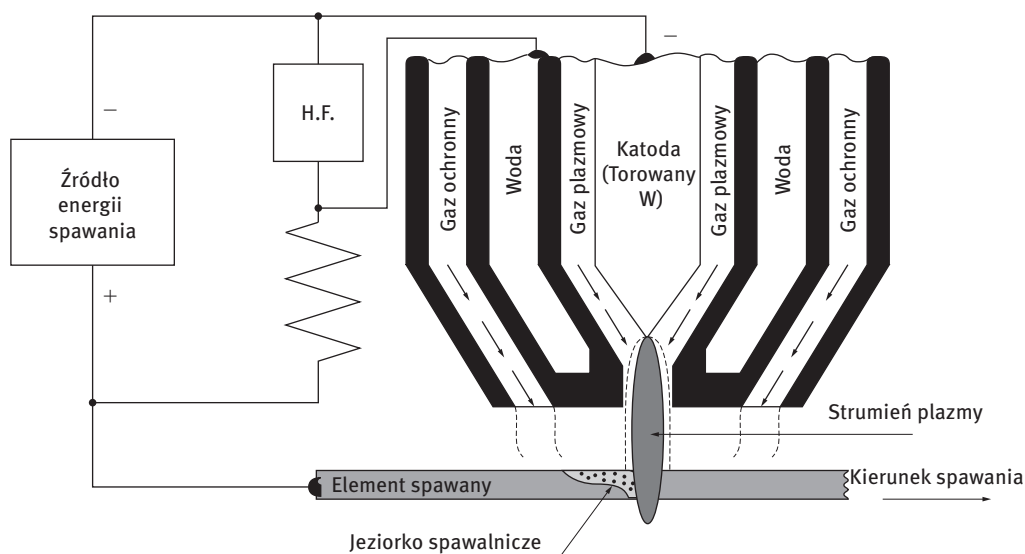
Spawanie łukiem plazmowym PAW

Na rysunku 3.1.13 przedstawiono zasadę spawania łukiem plazmowym PAW (Plasma Arc Welding). Pierwsze próby budowy urządzenia wytwarzającego łuk elektryczny podjęli w 1920 roku Gerdien i Lotz, którzy opracowali doświadczalne oprzyrządowanie wytwarzające łuk elektryczny między dwoma grafitowymi elektrodami w obecności pary wodnej. Pomimo to urządzenia takiego typu doczekały się praktycznego zastosowania w spawalnictwie dopiero w roku 1955, kiedy to amerykańska firma Union Carbide opatentowała urządzenie do spawania plazmowego łukiem zwężonym pochodzącym z metody TIG. Zwężenie wyładowania łukowego powoduje, iż powstaje strumień zjonizowanego gazu zwanego plazmą, która charakteryzuje się bardzo dobrym przewodnictwem elektrycznym. Wytworzona plazma posiada wysoką energię i osiąga temperaturę od 10000 do 20000 K. W procesie spawania powszechnie wykorzystuje się zwężony łuk „bezpieczny” utworzony pomiędzy elektrodą a elementem spawanym, podczas gdy w innych

zastosowaniach stosuje się częściej zwężony łuk „niezależny” uzyskany między elektrodą a specjalną kryzą. Ponieważ strumień plazmy jest wyjątkowo wąski, nie może on zapewnić wystarczającej ochrony dla jeziora spawalniczego, dlatego więc konieczne jest zastosowanie pierścieniowego strumienia gazu ochronnego o większej średnicy.

Gazy stosowane zarówno w tej metodzie, jak i dla tworzenia plazmy są podobne do gazów stosowanych w metodzie TIG, są to: czysty argon (Ar), Ar-5% H₂, Ar-10% H₂ i 25% argon-75% hel. Mieszanki zawierające wodór są zalecane do spawania austenitycznych stali nierdzewnych, lecz podobnie jak w przypadku spawania metodą TIG są zakazane do stosowania dla stali martenzytycznych, ferrytycznych oraz stali ferrytyczno-austenitycznych typu duplex. Przy spawaniu stali duplex zaleca się stosowanie dodatku azotu w celu zachowania właściwej proporcji między austenitem i ferrytem w spoinie.

Przy ręcznym spawaniu plazmowym, stosowane są procesy „mikroplazmowe” i „mini



Rys. 3.1.13 - Zasada spawania plazmowego z oczkiem (strumień penetruje element obrabiany i wytania się z drugiej strony elementu).

plazmowe” dla prądów między 0,1 i 15 amperów oraz technika „z jeziorkiem” dla prądów od około 15 do 100 A. Przy spawaniu automatycznym, gdy uchwyt jest zamontowany na wózku, stosowana jest tak zwana metoda z „oczkiem”. W porównaniu do metody spawania TIG należy zwrócić uwagę, że pozycja wylotowa strumienia gazów i elektrody w stosunku do wylotu kryzy odgrywa decydującą rolę w zwężeniu kształtu łuku. Główną zaletą metody PAW w porównaniu do TIG jest duża stabilność łuku, która powoduje:

- powstawanie „sztywnego” łuku, który umożliwi lepszą kontrolę wprowadzanej energii,
- większą tolerancję na zmiany odległości pomiędzy dyszą a spawanym elementem, bez istotnej zmiany budowy spoiny,
- polepszone spawanie z materiałem dodatkowym, z powodu większej

odległości między kryzą dyszy a spawanym elementem.

- wąską strefę wpływu ciepła (SWC) i większą prędkość spawania,
- większą tolerancję na wadliwe przygotowanie, szczególnie w przypadku spawania z oczkiem.

W tabelicy 3.1.5 przedstawiono parametry zalecane do spawania austenitycznej stali nierdzewnej gatunku X5CrNi18-10/1.4301.

Tablica 3.1.5 - Zalecane parametry spawania plazmowego z „oczkiem” dla austenitycznej stali nierdzewnej X5CrNi18-10/1.4301, dla spoiny doczołowej.

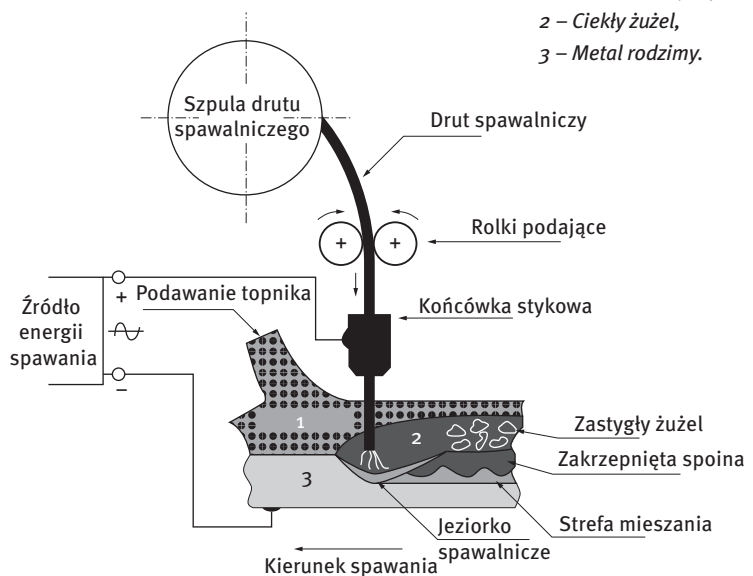
Grubość blachy (mm)	Prąd spawania (A)	Natężenie przepływu gazu plazmowego (l/min.)	Natężenie przepływu gazu osłownego (l/min.)	Prędkość spawania (cm/min.)
1,5	100	5	30	100
3,0	200	7	30	60
6,0	300	12	30	30
8,0	330	13	30	25

Spawanie łukiem krytym SAW

Metoda spawania łukiem krytym SAW (Submerged Arc Welding) została jednocześnie opracowana przez Lincoln Electric Company w USA i przez B.E. Paton Institute w Kijowie przed drugą wojną światową. Najbardziej znana jest zautomatyzowana wersja tej metody gdzie jeden lub kilka drutów elektrodowych jest topionych pod sproszkowanym topnikiem, który tworzy ochronną powłokę stopionego żużla. Pomimo, że żużel wykazuje pewien stopień przewodności elektrycznej, to topienie zasadniczo następuje przez łuk elektryczny, a nagrzewanie rezystancyjne przez żużel ma tylko drugorzędne znaczenie.

W metodzie automatycznej (rys. 3.1.14), można spawać bardzo dużym prądem, aż do 2000 A na jeden drut, co daje dużą wartość

Rys. 3.1.14 - Zasada spawania łukiem krytym SAW.
1 – Granulowany topnik,
2 – Ciekły żużel,
3 – Metal rodzimy.



wprowadzonej mocy i w konsekwencji prowadzi do silnego rozpuszczenia materiału rodzimego przez materiał dodatkowy (do 80%). Źródłem energii jest zazwyczaj prąd stały przy dodatniej biegunowości na elektrodzie (DCEP), a rzadziej prąd przemienny (AC) gdy stosuje się jednocześnie kilka drutów, aby uniknąć zjawiska ugięcia łuku. Dla źródeł prądu stałego jak i przemiennego w celu uzyskania w pełni stabilnego łuku prędkość podawania drutu spawalniczego musi być równa prędkości jego topienia. Uzyskuje się to poprzez zastosowanie rolek podających, napędzanych przez system przekładniowy z serwokontrolowaną prędkością.

Równie ważnym czynnikiem w tym procesie jest dobór odpowiedniego topnika do spawania spośród pięciu dostępnych typów:

- Typ 1: krzemianowo manganowy,
- Typ 2: krzemianowo wapienny,
- Typ 3: korundowo rutyłowy,
- Typ 4: wapienno korundowy,
- Typ 5: wapienno fluorkowy.

Do spawania stali nierdzewnych, najczęściej stosuje się topnik typu „wapienno-fluorkowego” o składzie: $25\% \leq \text{CaO} + \text{MgO} \leq 40\%$, $\text{SiO}_2 \leq 15\%$, $20\% \leq \text{CaF}_2 \leq 35\%$. Istnieją dwie formy tego topnika: wytwarzane przez topienie lub przez spiekanie. Topione topniki powstają w wyniku nagrzania do temperatury 1600-1700 °C i następnie są przetwarzane na postać proszkową przez rozpylanie lub przez kruszenie i przesiewanie zestalonego materiału. Spiekane topniki są produkowane z surowców o odpowiedniej ziarnistości, spiekanych z alkaliczno-krzemianowym spoiwem. Otrzymana mieszanina podlega suszeniu, a następnie obróbce mechanicznej w celu uzyskania wymaganej wielkości cząstek proszku. Tak uzyskany materiał jest ponownie wygrzewany w

wysokiej temperaturze, która w niektórych przypadkach może przekraczać 700 °C.

Topniki w stanie dostawy są całkowicie suche i dają zawartość wodoru poniżej 5 cm³/100 g wprowadzonego stopiwa. Aby zabezpieczyć topniki przed wchłanianiem wilgoci, zaleca się ich przechowywanie w temperaturze wyższej o 10 °C od temperatury warsztatu, w atmosferze o wilgotności względnej nie przekraczającej 50%. Jeżeli istnieje niebezpieczeństwo lub obawa zawilgocenia, wskazane jest wysuszenie proszku w temperaturze 300 °C przez okres co najmniej 2 godzin. Dla efektywnego schnięcia topnik musi być równomiernie rozłożony na metalowych tacach, a grubość warstwy nie może przekraczać 40 mm. Wielkość ziarna materiału topnika jest określona za pomocą analizy sitowej. Numer sita (liczba „mesh”) określa liczbę oczek na jednostkę długości (zazwyczaj 1 cala). Skala Tylera stosowana do określania ziarnistości przesiewanych proszków rozpoczyna się od numeru sita 200, co odpowiada 200 oczkom na długości jednego cala (25,4 mm). w Tabelicy 3.1.6 przedstawio-

Tabelica 3.1.6 - Zależność pomiędzy numerem sita w skali Tylera i wymiarami otworów.

Numer sita „mesh”	Rozmiar otworu (wymiarów boków oczek kwadratowych – mm)
8	2,362
12	1,397
14	1,168
16	0,991
20	0,833
42	0,350
60	0,246
100	0,147
150	0,104
200	0,074

no zależność pomiędzy numerem sita (liczba „mesh”) i wymiarem otworu (wymiarem boków oczek kwadratowych).

Podczas wyboru grubości ziarna materiału topnika należy brać pod uwagę dwie podstawowe zasady. Po pierwsze, dla wszystkich pozycji spawania z wyjątkiem pozycji podolnej (np. spoin pachwinowych i doczołowych w pozycji podolnej) zaleca się zastosowanie

proszków drobnoziarnistych. Po drugie, dla procedur wymagających wysokiego prądu spawania zaleca się także proszki drobnoziarniste. Zastosowany topnik odgrywa decydującą rolę w transporcie pierwiastków stopowych od spoiwa do jeziora spawalniczego, a jego wpływ jest określony przez wskaźnik zasadowości żużła, który może być wyrażony zależnością S.S. Boniszewskiego:

$$B = \frac{[\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{Li}_2\text{O} + \text{CaF}_2 + 1/2(\text{MnO} + \text{FeO})]}{[\text{SiO}_2 + 1/2(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2)]}$$

Im wyższy jest wskaźnik, tym efektywniejszy jest transport pierwiastków stopowych. Krzemionka SiO_2 reaguje z chromem zatrzymując go w żużlu w formie tlenków. Rutyl, TiO_2 , ma podobne działanie lecz mniejszą intensywność. Stosując topniki o wskaźniku zasadowości poniżej 1 można utlenić do 30% chromu. Natomiast dla wysoko zasadowych topników ($B > 3$), straty chromu będą mniejsze niż 10% i można je łatwo skompensować przez dodatki żelazochromu do topnika. Nikiel i molibden charakteryzują się niższą skłonnością do utleniania i dlatego posiadają dobry współczynnik przenikania w łuku spawalniczym.

Spawanie łukiem krytym jest stosowane głównie dla cienkich blach z austenitycznej stali nierdzewnej i w tym przypadku należy zwrócić uwagę na ryzyko powstawania fazy sigma z powodu zastosowania wysokich

energii spawania. Zjawisko to dotyczy szczególnie gatunków stali zawierających 25%Cr - 20%Ni, ale również gatunków 18%Cr - 9%Ni z dużym udziałem ferrytu. Podczas spawania wieloprzebiegowego, kiedy materiał poddawany jest kilkakrotnie oddziaływaniu cykli cieplnych w zakresie temperatury 650-900 °C, ryzyko powstania fazy sigma jest znacznie większe. Dlatego po takiej obróbce zaleca się przesycać stali w temperaturze 1050 °C.

W tablicy 3.1.7 przedstawiono zalecane parametry spawania w funkcji średnicy drutu spawalniczego i wielkości ziarna topnika.

Tablica 3.1.7 - Zalecane parametry spawania w funkcji średnicy drutu spawalniczego i wielkości ziarna topnika.

Średnica drutu spawalniczego (mm)	Prąd spawania (A)	Napięcie łuku (V)	Wielkość ziarna topnika (mesh)
2,4	250 – 500	22 – 32	8 × 48
3,2	300 – 700	23 – 36	14 × 48
4,0	400 – 900	24 – 40	16 × 150
5,0	500 – 1100	25 – 43	42 × 200

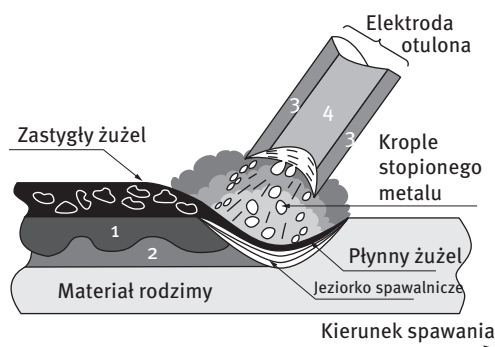
Spawanie łukiem osłoniętym elektrodą metalową (elektroda otulona): SMAW

Chociaż metoda SMAW (Shielded Metal Arc Welding) jest metodą bardzo starą, gdyż jej pierwsze zastosowanie zostało opisane przez Kjelberga w roku 1907, jest w dalszym ciągu powszechnie stosowana ze względu na wielką elastyczność i prostotę wdrożenia. Elektroda składa się z rdzenia metalowego otulonego warstwą topnika (rys. 3.1.15). Rdzeń stanowi zazwyczaj drut spawalniczy ze stali nierdzewnej, lecz w niektórych bardzo szczególnych przypadkach drut rdzenia może być ze stali miękkiej („syntetyczne” elektrody). Otulina, która odgrywa w procesie decydującą rolę jest prasowana na rdzeń i nadaje każdej elektrodzie jej specyficzne indywidualne cechy. Spełnia ona trzy podstawowe funkcje: elektryczną, fizyczną i metalurgiczną. Funkcja elektryczna jest związana z inicjacją i stabili-

zacją łuku, podczas gdy funkcja fizyczna dotyczy lepkości i napięcia powierzchniowego żuźla, które regulują przenoszenie kropli metalu, efektywną ochronę jezioraka spawalniczego i jego zwilżalności oraz zdolność do wykonywania spoin (np. doczołowych w pozycji pionowej w górę i w pozycji podolnej). Rola metalurgiczna obejmuje wymianę chemiczną między jeziorkiem spawalniczym a żużlem, to znaczy rafinację metalu spoiny. Otulina zawiera pewną ilość węgla wapnia ($CaCO_3$), który dysocjuje w łuku w temperaturze około 900 °C, tworząc CaO i CO_2 , z których ten ostatni zapewnia osłonę strefy łuku. Ostatecznie tak jak w metodzie SMAW dla stali miękkich, żużel umożliwia wprowadzanie do reakcji rafinacji dodatkowych pierwiastków niewystępujących w rdzeniu elektrody lub występujących w bardzo małym udziale.

Elektrody z otuliną rutyłową można stosować zarówno przy prądzie stałym, jak i prądzie przemiennym, podczas gdy elektrodami z otuliną zasadową (wapienną) zasadniczo spawa się prądem stałym z biegunowością dodatnią na elektrodzie (DCEP). Zalecane parametry spawania dla otulin dających spoinę o składzie 17% Cr oraz 19% Cr-10% Ni przedstawiono w tablicy 3.1.8.

Rys. 3.1.15 - Zasada spawania łukiem osłoniętym elektrodą metalową SMAW
1 – Skrzepnięta spoina,
2 – Strefa mieszania,
3 – Elektroda otulona,
4 – Rdzeń elektrody.



Tablica 3.1.8 - Zalecane parametry spawania metodą SMAW w funkcji średnicy rdzenia elektrody.

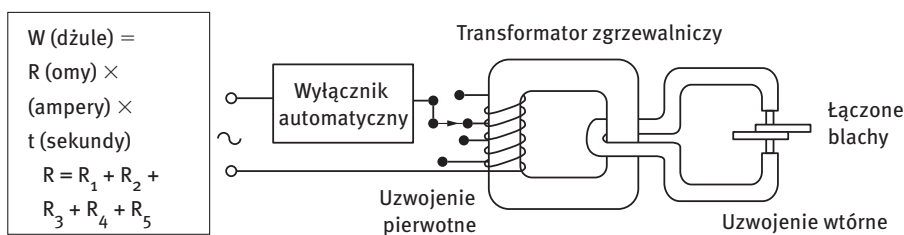
Średnica rdzenia elektrody (mm)	Prąd spawania (A)	
	Spoina ferrytyczna 17%	Spoina austenityczna 19% Cr-10% Ni
2,5	50 – 100	40 – 90
3,2	80 – 110	60 – 100
4,0	110 – 160	90 – 150
5,0	150 – 230	130 – 220

Zgrzewanie rezystancyjne

Rezystancyjne zgrzewanie punktowe (RSW)

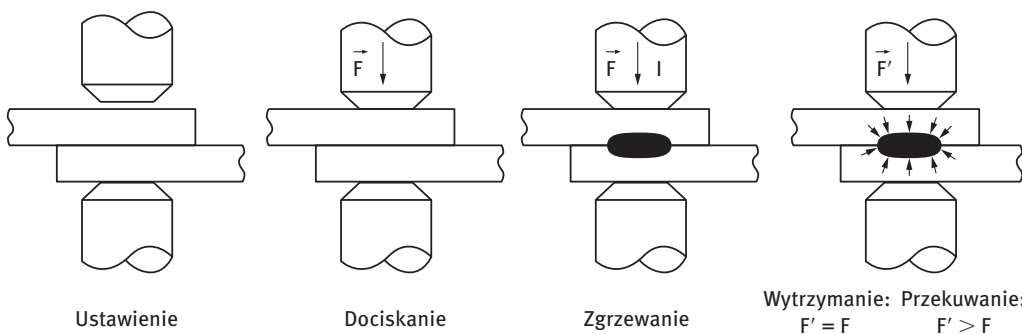
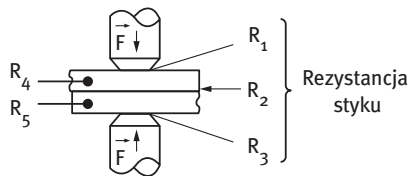
Metoda ta jest w dalszym ciągu szeroko stosowana do zgrzewania cienkich blach ze stali nierdzewnej. Proces topienia jest zapoczątkowany przez nagrzewanie rezystancyjne wywołane przepływem prądu przez zgrzewane materiały w miejscu łączenia. Rozróżnia się ogólnie pięć odrębnych etapów w procesie zgrzewania punktowego (rys. 3.1.16): ustawianie łączonych blach, obniżenie górnej

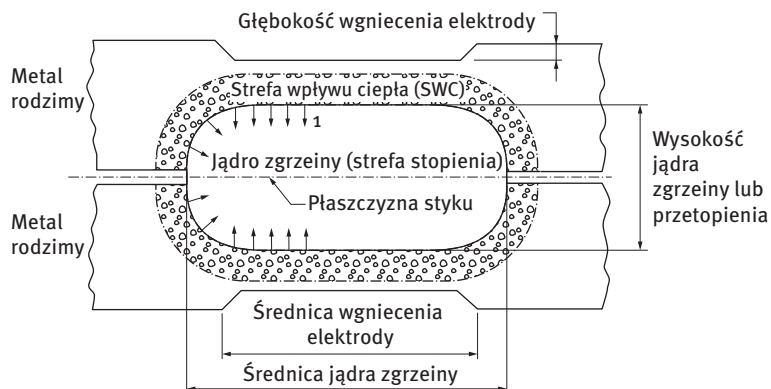
elektrody i wywarcie siły docisku, zgrzewanie prądem przemiennym o niskim napięciu poprzez wytworzenie energii cieplnej W (dżule) $= R$ (omy) $\times I^2$ (ampery), utrzymanie siły docisku lub zastosowanie dodatkowej siły docisku, podniesienie górnej elektrody przed przejściem do następnego cyklu.



Rys. 3.1.16 - Zasada rezystancyjnego zgrzewania punktowego.

R_4 i R_5 : rezystancja łączonych blach (zależna od ich rezystancji właściwej)
 R_2 : rezystancja styku między dwoma blachami zależna od stanu powierzchni oraz siły docisku \vec{F}
 R_1 i R_3 : rezystancje styku między elektrodami i blachami





Rys. 3.1.17 - Schemat metody zgrzewania punktowego i powstawania jądra zgrzeiny. 1 – Schematyczne przedstawienie powstawania dendrytów.

Biorąc pod uwagę materiał elektrody dla stali nierdzewnych, najlepsze połączenie niskiej rezystancji i wysokiej wytrzymałości mechanicznej uzyskuje się podczas zastosowania stopów miedź – kobalt – beryl. Końcówki elektrod mają zazwyczaj kształt ściętego stożka o kącie rozwartym 120°. Tworzenie się jądra zgrzeiny (rys. 3.1.14) zależy od prądu zgrzewania i czasu jego oddziaływania oraz od siły docisku wywieranej przez elektrody. Parametry zgrzewania zalecane dla stali austenitycznych 18% Cr – 9% Ni oraz stabilizowanych gatunków ferrytycznych 17% Cr przedstawiono w tabelicy 3.1.9.

Parametry podane w tabelicy 3.1.9 powinny być zoptymalizowane po względem stanu

powierzchni (wytrawiona – 2D, 2B, wyżarzona bez nalotu – 2R), który ma duży wpływ na rezystancję styku, a ta z kolei odgrywa decydującą rolę w tworzeniu się jądra zgrzeiny. W przeciwieństwie do procesów spawania, przy rezystancyjnym zgrzewaniu punktowym jeziorko ciekłego metalu nie może być kontrolowane wizualnie. Jedyne wady postrzegalne wzrokowo to nadmierne wgniecenie elektrody i rozprysk na powierzchni. Prosta, aczkolwiek niszcząca metodą badania jest tak zwana próba odrywania, która umożliwia szybkie sprawdzenie jakości wykonanej zgrzeiny punktowej.

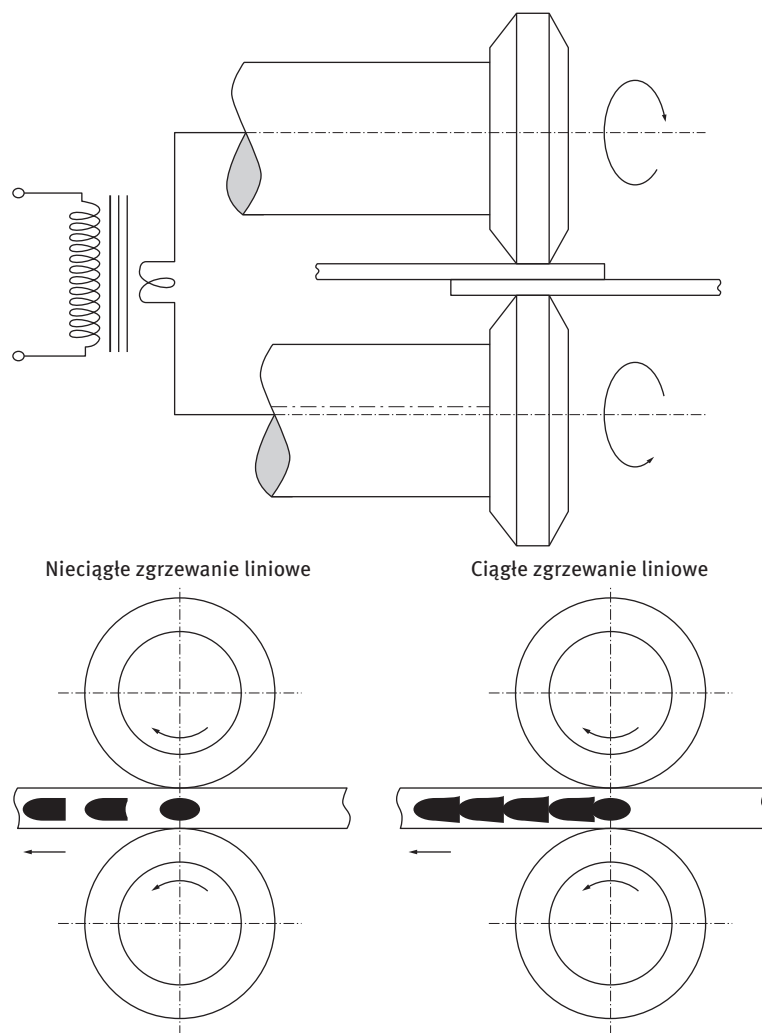
Tablica 3.1.9 - Zalecane parametry rezystancyjnego zgrzewania punktowego dla stali austenitycznych 18% Cr - 9% Ni oraz stabilizowanych gatunków ferrytycznych 17% Cr.

Grubość blachy (mm)	Średnica końcówki elektrody (mm)	Siła docisku elektrody (daN)	Prąd zgrzewania (A)	Czas Zgrzewania (liczba okresów)
Gatunki austenityczne 18% Cr - 9% Ni				
0,5	3,0	170	3500	3
0,8	4,5	300	6000	4
2,0	6,0	650	11000	8
Stabilizowane gatunki ferrytyczne 17% Cr				
0,5	3,0	150	4000	3
0,8	4,5	250	7500	4

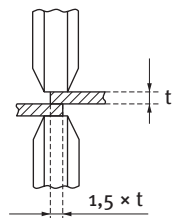
Rezystancyjne zgrzewanie liniowe (RSEW lub SW)

Zasada rezystancyjnego zgrzewania liniowego jest podobna do zgrzewania punktowego, z tą różnicą, że jest to proces ciągły. Główna różnica polega na rodzaju zastosowanych elektrod, którymi są dwa krążki ze stopu miedzi wyposażone w odpowiedni system napędu (rys. 3.1.18 i 3.1.19). W porównaniu do zgrzewania punktowego, gdzie podstawowymi parametrami procesu są prąd zgrzewania, czas nagrzewania oraz siła docisku elektrod, dodatkowymi czynnikami, które należy brać pod uwagę przy zgrzewaniu liniowym jest: zastosowanie prądu modulowanego lub pulsacyjnego oraz prędkość zgrzewania (prędkość linowa krążka przekłada się na przemieszczenie blachy). Najczęściej stosowanym materiałem na elektrody krążkowe jest stop na bazie miedzi z dodatkami kobaltu i berylu dla polepszenia wytrzymałości mechanicznej. Krawędzie elektrod krążkowych zazwyczaj mają obustronne ukośne ścięcia lub profil wypukły. W tabelicy 3.1.10 przedstawiono zalecane parametry zgrzewania austenitycznych stali Fe-Cr-Ni.

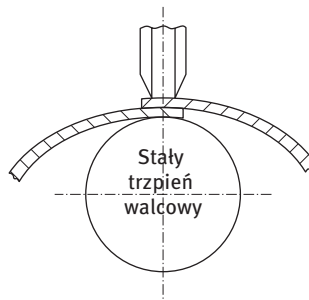
Rys. 3.1.18 - Zasada rezystancyjnego zgrzewania liniowego.



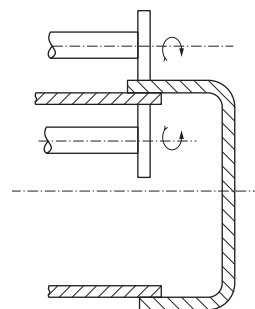
Rys. 3.1.19 - Typowe zespoły wytwarzane z zastosowaniem rezystancyjnego zgrzewania liniowego.



Zgrzewanie zgniotowe



Wzdłużne zgrzewanie cylindrycznego elementu



Poprzeczne zgrzewanie dna do walcowego pierścienia

Tablica 3.1.10 -
Zalecane parametry
rezystancyjnego
zgrzewania liniowego
dla austenitycznej
stali nierdzewnej
18% Cr - 9% Ni.

Grubość blachy (mm)	Grubość krążka (mm)	Siła docisku (daN)	Czas zgrzewania (okresy)	Czas przerwy (okresy)	Prąd zgrzewania (A)	Prędkość zgrzewania (cm/min.)
0,5	3,0	320	3	2	7900	140
0,8	4,5	460	3	3	10600	120
1,5	6,5	800	3	4	15000	100
2,0	8,0	1200	4	5	16700	95
3,0	9,5	1500	5	7	17000	95

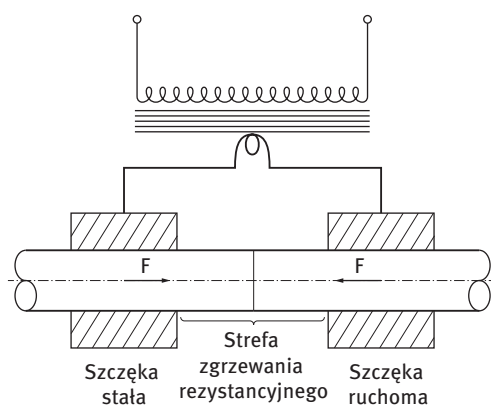
W tablicy 3.1.10 przedstawiono modulację prądu spawania podczas rezystancyjnego zgrzewania liniowego. Odległość pomiędzy kolejnymi zgrzewami jest określona przez częstotliwość impulsów (czas zgrzewania i czas przerwy) i prędkość zgrzewania (prędkość obwodową krążka). Prędkość zgrzewania jest dobierana na podstawie gatunku stali i grubości blachy, a czas przerwy jest określony przez prędkość zgrzewania.

Zarówno w zgrzewaniu punktowym, jak i liniowym, głównymi zaletami elektrycznego nagrzewania rezystancyjnego jest ograniczo-

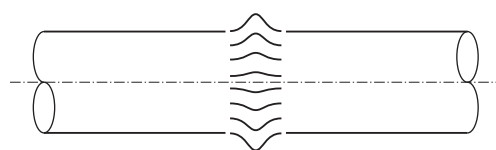
na zmiana mikrostruktury w strefie wpływu ciepła, brak utleniania powierzchni, gdy blachy są właściwie chłodzone (przez strumień zimnej wody) oraz bardzo małe odkształcenie blach po zgrzewaniu.

Odmiany zgrzewania rezystancyjnego

Zgrzewanie rezystancyjne doczołowe (UW) zgrzewanie rezystancyjne doczołowe (UW – Upset welding) lub zgrzewanie doczołowe zwarciowe (rys. 3.1.20 i 3.10.21) stosuje się głównie dla elementów długich (prętów, rur i kształtowników). Łączone płaszczyzny elementów muszą zapewniać dobrą styczność powierzchni, co ułatwia przepływ prądu nagrzewania, który do elementów zgrzewanych podawany jest przez stałe i ruchome szczęki zaciskowe. Przepływ prądu powoduje intensywne nagrzewanie w obszarze między szczękami oraz miejscowe podwyższenie temperatury na powierzchni styku elementów dzięki dodatkowej rezystancji ze styku. Po osiągnięciu dostatecznej temperatury szczęki zaciskowe wywołują docisk elementów do siebie i w efekcie ich zgrzewanie, bez topienia materiału. Ze względu na wysoką siłę docisku między elementami ich przekrój poprzeczny musi być wystarczająco duży, aby nie doszło do ich wybożenia. Po zakończeniu zgrzewania w strefie styku obserwuje się znaczne spęcznienie ele-



Rys. 3.1.20 - Zasada rezystancyjnego zgrzewania doczołowego.



Rys. 3.1.21 - Rezystancyjne zgrzewanie doczołowe pręta walcowego.

mentów. Przedstawiona metoda zgrzewania jest bardzo stara, już została opisana w 1887 przez Elihu Thomsona a obecnie jest wypierana przez bardziej elastyczną metodę doczołowego zgrzewania iskrowego.

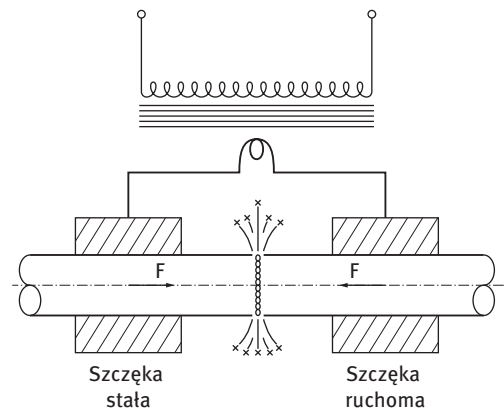
Pomimo swych ograniczeń, metoda rezystancyjnego zgrzewania doczołowego jest

Zgrzewanie iskrowe (FW)

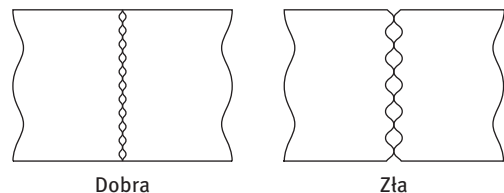
Pomimo, że zgrzewanie iskrowe jest podobne do doczołowego zgrzewania rezystancyjnego, w rzeczywistości jest ono całkowicie różne (rys. 3.1.22, 3.1.23 i 3.1.24). Mianowicie w trakcie doczołowego zgrzewania rezystancyjnego zaobserwowano, że ilekroć brzozy czołowe nie są w wystarczającym zwarcu, prąd przechodzi tylko przez kilka małych obszarów, co prowadzi do intensywnego lokalnego nagrzewania i szybkiego topienia, tworząc łuki, które gwałtownie wyrzucają stopiony metal ze złącza z powodu pojawiających się pól magnetycznych (zjawisko wyiskrzania). Do istotnych parametrów tej metody należą: prąd zgrzewania oraz napięcie, które musi być wystarczające dla spowodowania wyiskrzania, chwilowa prędkość wyiskrzania, która musi być proporcjonalna do zużycia metalu i skompensowana przez przesuw ruchomego zacisku, czas trwania wyiskrzania oraz etap końcowego spęczania. Chropowatość początkowych powierzchni styku złącza musi zapewnić wystarczającą ilość dobrze rozłożonych punktów styku w celu wytworzenia równomiernego iskrowania na całej powierzchni złącza (rys. 3.1.23). Po spęczeniu, profil złącza powinien wykazywać charakterystyczny trój-żebrowy profil wskazujący na prawidłowe wykonanie zgrzewania (rys. 3.1.24).

wciąż stosowana do łączenia drutów w kręgach w celu ułatwienia ciągłego ciągnięcia drutu, do średnicy 8,0 mm.

Rys. 3.1.22 - Zasada doczołowego zgrzewania iskrowego.

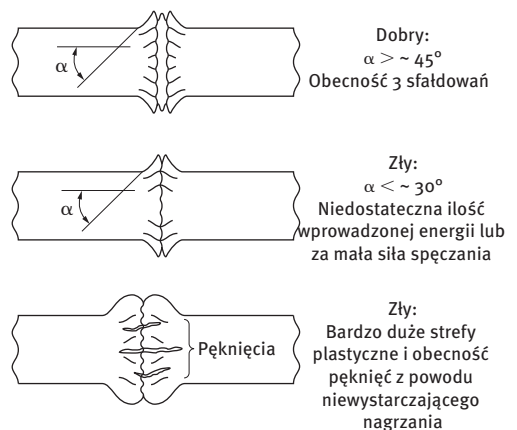


Rys. 3.1.23 - Nierówności przylegających powierzchni styku w złączu muszą być symetryczne w stosunku do płaszczyzny złącza.



– Optymalna energia wyiskrzania wytwarza wiele małych kraterów (po lewej)
 – zbyt duża energia wyiskrzania powoduje nieliczne głębokie kratery (po prawej).

Rys. 3.1.24 - Wpływ parametrów zgrzewania na końcowy profil zgrzeiny.



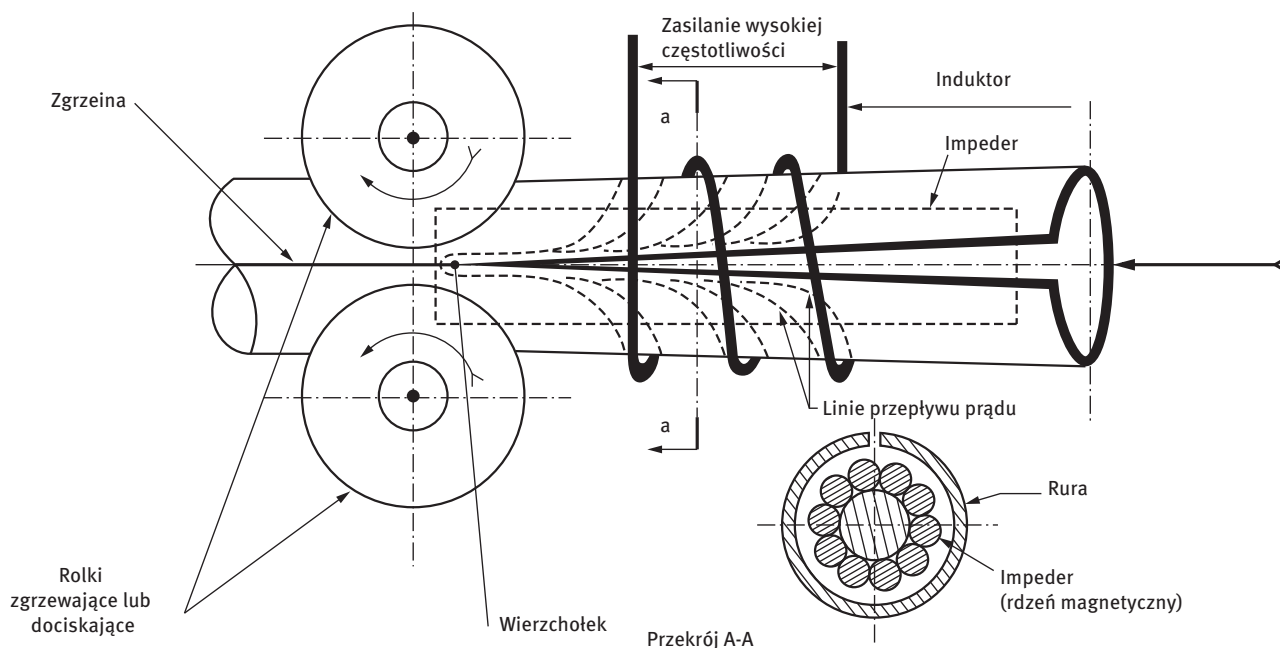
Zgrzewanie indukcyjne prądem wysokiej częstotliwości (HFIW)

Zgrzewanie indukcyjne prądem wysokiej częstotliwości (rys. 3.1.25) jest głównie stosowane do wytwarzania rur z taśm. Proces ten jest realizowany w ciągłej linii gdzie zgrzewanie poprzedza system profilowania wielorolkowego. Po wyjściu z ostatniego zestawu rolek rura posiada podłużną szczelinę, która jest zamykana przez zgrzewanie. Złącze jest formowane przez utworzenie styku w stanie stałym z pośrednim topieniem, gdy brzegi taśmy zostają dociśnięte do siebie przez parę poziomych rolek (rolki dociskające). Z powo-

du występowania zjawiska naskórkowości, indukowany prąd wysokiej częstotliwości (140 Hz do 500 Hz) podąża drogą minimalnej impedancji, koncentrując ciepło na brzegach (rys. 3.1.25).

W przypadku ferrytycznych stali nierdzewnych, metoda ta pozwala uniknąć zjawiska rozrostu ziarna, często występującego w tych gatunkach. W tym przypadku, stosuje się moc zgrzewania od 150 do 300 kW w zależności od średnicy rur, a prędkość zgrzewania wynosi od 50 do 90 m/min.

Rys. 3.1.25 - Zasada zgrzewania iskrowego prądem wysokiej częstotliwości.

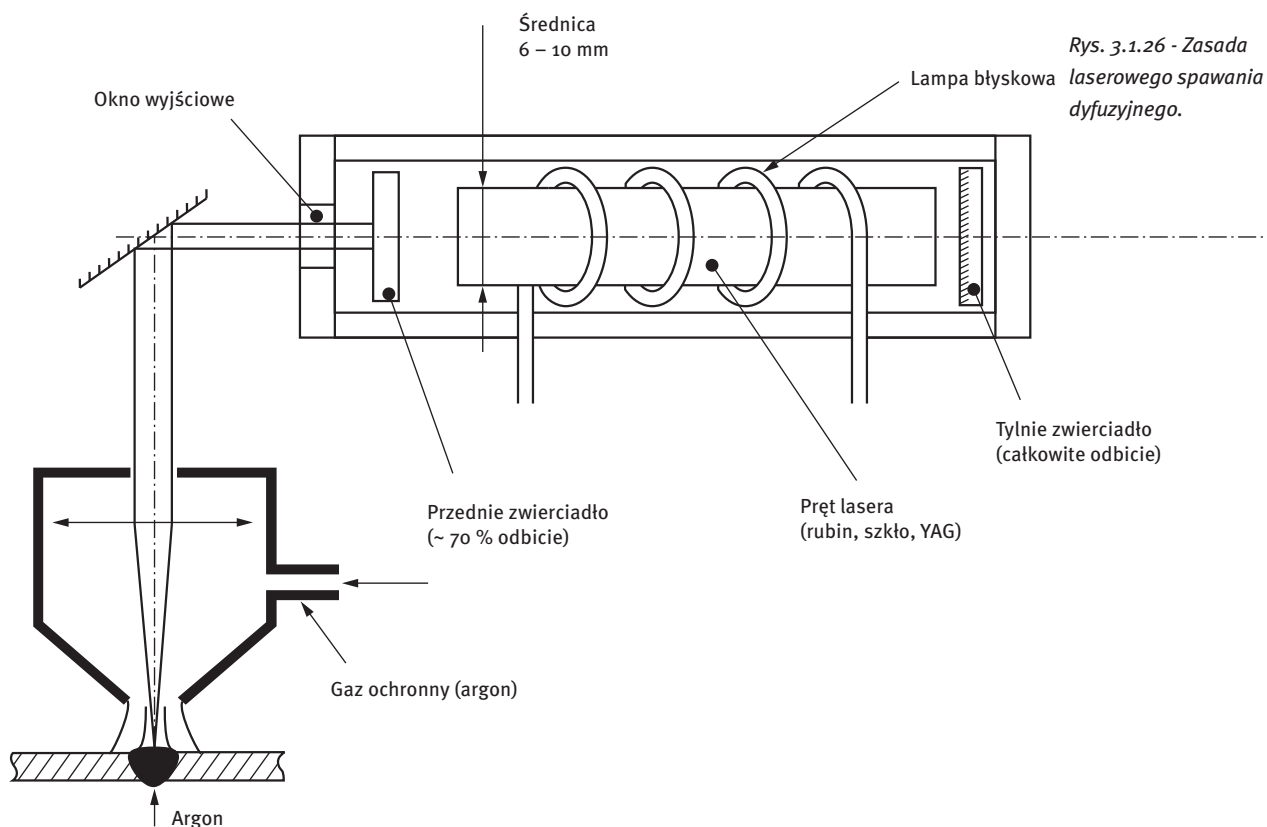


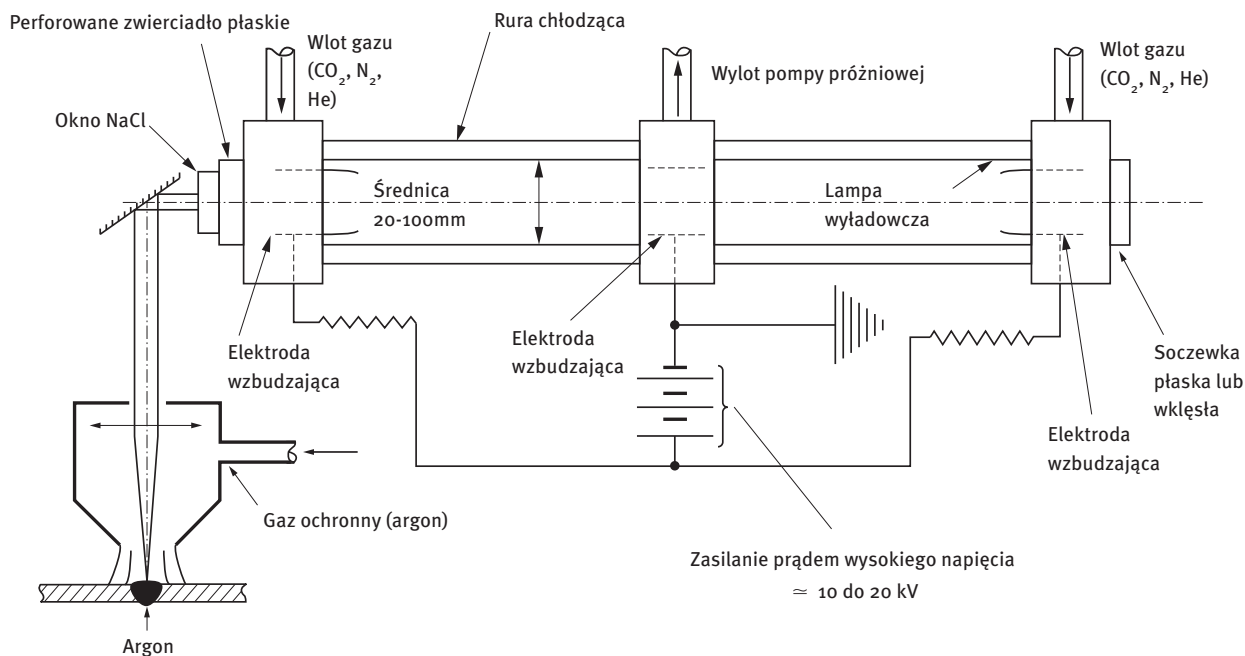
Spawanie laserowe (LBW)

Efekt laserowy (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) w zakresie długości fali optycznej został odkryty przez Maimana w 1958 r., po czym pojawiła się możliwość zastosowania wiązki laserowej w spawalnictwie, jako bezstykowego źródła energii o dużym natężeniu i stopniu skupienia. Szczególnie, że w przeciwieństwie do spawania elektronowego nie wymaga próżni. Na rysunkach 3.1.26 i 3.1.27 przedstawiono schematy urządzeń do spawania dyfuzyjnego i spawania laserem gazowym. Stosowane poziomy mocy są szczególnie wysokie dla lase-

rów CO_2 , chociaż należy pamiętać, że efektywna moc używana podczas spawania zależy od współczynnika odbicia spawanego materiału dla danej padającej długości fali.

Najczęściej stosowanymi źródłami do spawania są lasery gazowe CO_2 oraz lasery typu YAG, w których medium laserowym jest ciało stałe – pręt o składzie itr-aluminium-granat. Lasery typu YAG nadają się szczególnie do spawania cienkich blach ze stali nierdzewnej ($< 1,5$ mm) w pulsacyjnym trybie pracy. Tak zwane lasery CO_2 , w których w rzeczywistości gazem laserowym jest mieszanina CO_2 - N_2 -He





Rys. 3.1.27 - Zasada spawania laserem gazowym CO_2 (CO_2 , N_2 , He).

są bardziej przydatne do spawania grubszych blach ze stali nierdzewnej o grubości (1,5-6,0 m).

Podobnie jak w przypadku zgrzewania indukcyjnego prądem wysokiej częstotliwości, metoda ta jest szeroko stosowana w produkcji rur spawanych wzdłużnie. Przy mocy około

6 kW, taśma o grubości 2 mm ze stabilizowanej stali ferrytycznej o zawartości 17% chromu może być spawana z prędkością około 7 m/min, a ponieważ cykl cieplny jest bardzo krótki, to zjawisko rozrostu ziaren w strefie wpływu ciepła jest nieznaczne.

Pozostałe metody spawania

W ramach tego opracowania niemożliwe jest wyczerpujące opisanie wszystkich metod spawania. Opisano jedynie wybrane metody stosowane dla stali nierdzewnych. Jedną z unikalnych metod spawania jest spawanie elektronowe, które musi odbywać się w próżni, ale umożliwia wytwarzanie wysoko precyzyjnych złączy elementów zarówno cienkościennych jak i o dużym przekroju. Kolejną ciekawą metodą jest tarciove zgrzewanie

doczołowe, które jest stosowane do łączenia produktów długich (prętów). W tej metodzie obracający się z dużą prędkością element jest dociskany z określoną siłą do drugiego utwierdzonego nieruchomo. W wyniku zachodzących intensywnie procesów tarcia dochodzi do zgrzewania elementów z powodu ograniczonego topienia powierzchni oraz zgrzewania dyfuzyjnego.

Obróbka wykończeniowa złączy z austenitycznej stali nierdzewnej

Wytrawianie

W wyniku niektórych procesów spawania, złącze spawane (włącznie ze strefą wpływu ciepła) zostaje pokryte warstwą kolorowego tlenku, który musi być usunięty dla przywrócenia pasywności powierzchni stali. Stosuje się do tego następujące metody:

Kąpiele trawiące

- 52% kwas azotowy (36° Baumé'go) : 100 l
- 65% kwas fluorowodorowy : 20 l
- lub fluorek sodu : 30 kg
- woda : 900 l

Czas zanurzenia w temperaturze 20°C najczęściej wynosi od 1 do 3 godzin. Aby zapobiec korozji stali należy starannie kontrolować temperaturę kąpeli oraz czas zanurzenia. Po wytrawieniu elementy muszą być obficie spłukane czystą wodą – pozbawioną chloru.

Pasty i żele wytrawiające:

Zastosowanie past lub żeli umożliwia ograniczenie obróbki do strefy spoiny. Skład środków trawiących jest różnorodny, ale często zawierają one kwas azotowy. Pasta lub żel jest nakładana pędzlem, a następnie obszar ten jest czyszczony szczotką drucianą ze stali nierdzewnej. Po wytrawieniu, miejsce obróbki jest spłukiwane wodą.

Pasywacja

Po wytrawieniu, powierzchnia metalu pozostaje bez ochrony i konieczne jest wytworzenie nowej warstwy pasywnej w celu przywrócenia odporności stali na korozję. W pewnym stopniu przebiega to samoczynnie po wytrawieniu i spłukaniu wodą. Jednak dla uzyskania odpowiedniej jakości i szybkości pasywacji zalecane jest zanurzenie w kąpeli pasywacyjnej.

Kąpiele pasywacyjne

Element zanurza się w kwaśnej kąpeli o następującym składzie:

- 52% kwas azotowy (36° Baumé'go): 250 l
- woda : 750 l

Czas zanurzenia w temperaturze 20°C wynosi od 15 minut do 1 godziny. Po pasywacji elementy muszą być starannie spłukane wodą.

Pasty i żele pasywacyjne

Pasty i żele są stosowane do lokalnej pasywacji strefy spawania. Środek oparty na kwasie azotowym jest nakładany na obrabianą powierzchnię, a następnie całkowicie usuwany przy pomocy szczotki ze stali nierdzewnej lub szczotki nylonowej, po czym następuje spłukiwanie wodą.

Dekontaminacja

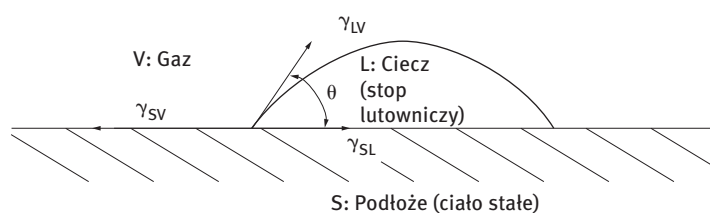
Różne operacje obróbki blach (cięcie, gięcie, formowanie, itd.) mogą pozostawić na powierzchni drobne cząstki żelaza, które muszą być z niej koniecznie usunięte. Pomimo, że cel procesu dekontaminacji jest odmienny to stosuje się te same metody jak dla procesów pasywacji.

3.2 Lutowanie lutem miękkim i twardym

Wprowadzenie

Lutowanie jest metodą łączenia elementów metalowych w stanie stałym za pomocą stopiwa (lutu) o temperaturze topnienia niższej od temperatury łączonych metali. W lutowaniu lutem miękkim stosuje się spoiwo o temp. topnienia

niższej od 450 °C, a lutowanie lutem twardym wymaga stopów twardszych o wyższej temp. topnienia. Decydującym czynnikiem procesu jest zapewnienie dobrej zwilżalności materiału łączonego przez roztopione spoiwo (rys. 3.2.1).



Kąt zwilżania: $\theta < 90^\circ \Rightarrow$ dobre zwilżenie podłoża przez stop lutowniczy

Równanie Younga: $\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta$

γ_{LV} : Napięcie powierzchniowe stopu lutowniczego w równowadze z jego parami (mN/m)

γ_{SV} : Napięcie powierzchniowe podłoża w równowadze z parami stopu lutowniczego (mN/m)

γ_{SL} : Napięcie powierzchniowe na granicy ciekłego stopu lutowniczego i podłoża (mN/m)

Rys. 3.2.1. - Zwilżalność podłoża przez stop lutowniczy

Lutowanie lutem twardym

Proces nagrzewania

Zastosowany proces nagrzewania uzależniony jest zarówno od względów ekonomicznych jak i typu łączonego elementu. Wybierając technikę nagrzewania spoiny należy mieć na względzie dwie podstawowe zasady:

- nagrzewanie musi być na tyle szybkie, aby zapewnić jednolite topienie lutu i zapobiegać przemianom strukturalnym w materiale rodzimym,
- połączenie lutowane musi być nagrzewane do jednorodnej temperatury, nieco wyższej

od temperatury likwidus zastosowanego lutu.

Do najczęściej stosowanych metod nagrzewania należą:

- nagrzewanie palnikiem acetylenowo-tlenowym,
- nagrzewanie indukcyjne wysokiej (HF) i średniej częstotliwości (MF),
- nagrzewanie w piecu przelotowym lub muflowym,
- nagrzewanie zanurzeniowe,
- nagrzewanie lutownicą pistoletową (dla lutów miękkich, nie dla twardych).

Nagrzewanie palnikiem acetylenowo-tlenowym

Przed lutowaniem łączone elementy muszą być pokryte topnikiem, zazwyczaj w formie pasty. Płomień musi mieć charakter neutralny wobec materiału podłoża. Jeżeli stop lutowni-

czy ma szeroki zakres topienia ($>50^\circ\text{C}$), aby uniknąć likwacji (częściowego roztopienia) łączone elementy należy nagrzwać do jednolitej temperatury.

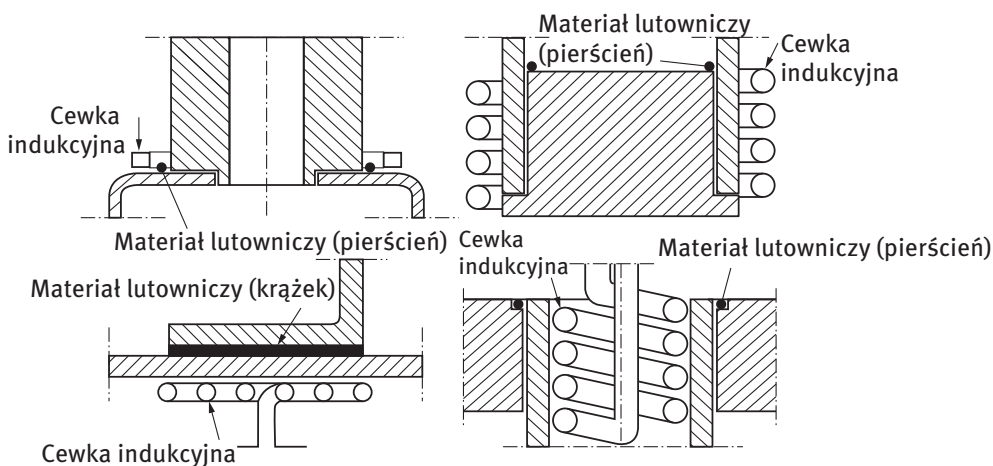
Nagrzewanie indukcyjne

Nagrzewanie indukcyjne jest prawdopodobnie najbardziej odpowiednią techniką nagrzewania podczas seryjnego lutowania lutem twardym elementów o złożonej geometrii. W tym przypadku kształt cewki indukcyjnej musi być odpowiednio dopasowany do geometrii elementów łączonych. Ponadto zastosowany materiał lutowniczy może mieć kształt krążka, pierścienia lub też inny. Szybkość nagrzewania indukcyjnego elementów łączonych i spoiwa jest wysoka, zazwyczaj trwa około 30 sekund. W praktyce stosuje się zarówno generatory wysokiej częstotliwości (300-500 kHz) dla elementów o niższej grubości i generatory średniej częstotliwości (kilkadziesiąt kHz) dla elementów grubszych. W rzeczywistości jednak głębokość penetracji powstałego ciepła zależy od zastosowanej częstotliwości i jest określona wzorem:

$$p = k \times \sqrt{\rho / \mu \times f}$$

gdzie: p – głębokość penetracji, f – częstotliwość, μ – przenikalność magnetyczna, ρ – rezystywność elektryczna, k – współczynnik proporcjonalności.

Praktycznie 90% ciepła jest wytwarzana w warstwie powierzchniowej o grubości p , podczas, gdy przenikalność magnetyczna μ i rezystywność elektryczna ρ materiału rodzimego są zasadniczo stałe, a głębokość penetracji p jest odwrotnie proporcjonalna do pierwiastka częstotliwości. Nagrzewanie indukcyjne jest efektywniejsze dla elementów o symetrii kołowej dlatego najczęściej stosuje się cewki o kształcie helikoidalnym i spiralnym umiejscowione wewnątrz lub na zewnątrz nagrzewanego elementu (rys. 3.2.2). Dla lutowania lutem twardym o relatywnie niskiej temperaturze topnienia nagrzewanie może odbywać się w powietrzu, lecz wymaga to zastosowania wytrawiającego topnika, którego nadmiar należy usunąć po zakończeniu procesu. Zastosowanie atmosfery neutralnej lub redukcyjnej podczas nagrzewania minimalizuje utlenianie się materiału.



Rys. 3.2.2. Systemy nagrzewania indukcyjnego podczas lutowania lutem twardym.

Nagrzewanie w piecu

Austenityczne stale nierdzewne (stopy Fe-Cr-Ni) są łatwo lutowane z zastosowaniem lutów twardych, głównie stopów Cu, Ag-Cu-Zn-Sn, Ni-Cr-B lub Ni-Cr-Si. Do lutowania stali nierdzewnych o strukturze ferrytycznej (stopy Fe-Cr) zwykle stosuje się luty stopów Si-Cu-Sn-Ni, Ag-Cu-Zn-Ni lub Ag-Cu-Zn-Sn stosując podobne procedury jak dla lutowania stali austenitycznych. Główna różnica przy lutowaniu stali ferrytycznych polega na konieczności ścisłego przestrzegania temperatury i czasu lutowania w celu uniknięcia nadmiernego rozrostu ziaren i wydzielen węglików chromu.

W piecu przelotowym lub muflowym ciepło jest wytwarzane przez spalanie paliwa węglowodorowego lub przez opór elektryczny. W celu uniknięcia utleniania powierzchni stali nierdzewnych, proces lutowania wykonuje się w próżni lub kontrolowanej atmosferze o charakterze obojętnym takiej jak suchy wodór lub mieszanina wodór-azot. Dla zapewnienia niskiego potencjału utleniania atmosfery, poziom jej wilgotności musi odpowiadać temperaturze punktu rosy przynajmniej -55°C , a jeśli to możliwe -70°C . W zależności od zastosowanego stopu lutowniczego temperatura pieca podczas lutowania wynosi od 600°C do 1200°C , a prędkość nagrzewania od $15^{\circ}\text{C}/\text{min}$ do $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

Chłodzenie natomiast początkowo odbywa się w próżni, a następnie z większą szybkością dla uniknięcia utleniania stali, zarówno w atmosferze redukcyjnej (dla stali austenitycznych) i atmosferze obojętnej (dla stali ferrytycznych). We wszystkich przypadkach czas wytrzymania w temperaturze lutowania nie może być wydłużony poza ściśle określony

czas wymagany dla operacji łączenia. Dobrą zwilżalność materiału rodzimego przez materiał lutu osiąga się już po kilku minutach.

Stabilizowane gatunki stali nierdzewnych o strukturze ferrytycznej poddane procesowi lutowania w próżni lub w osłonie gazu ochronnego wymagają zastosowania specjalnych procedur i odpowiednich spoiw. Wymóg ten jest związany z obecnością pierwiastków stabilizujących, które mogą mieć negatywny wpływ na zjawisko zwilżalności. W tym przypadku lutowanie najczęściej wykonuje się w atmosferze: czystego wodoru, wodór-10% azot, wodór-25% azot lub w próżni. Najczęściej stosowanymi pierwiastkami stabilizującymi są tytan i niob. Niob nie wpływa znacząco na zjawisko zwilżalności, natomiast tytan ma wyraźnie negatywny wpływ w szczególności, gdy występuje w stężeniu wyższym od wymaganego dla stabilizacji stali. Nowoczesne stopy lutownicze stosowane dla tych gatunków stali zawierają Cu-30% Mn-5% Ni i Cu30% Mn-5% Ag, które stosuje się w temperaturze od 1000°C w próżni o ciśnieniu 10-5 tor., lub w atmosferze czystego wodoru o punkcie rosy -60°C .

Opisane powyżej techniki nagrzewania są najczęściej stosowane do lutowania lutem twardym. W tablicy 3.2.1 przedstawiono twarde stopy lutownicze dla poszczególnych grup stali nierdzewnych: austenitycznych, ferrytycznych i martenzytycznych.

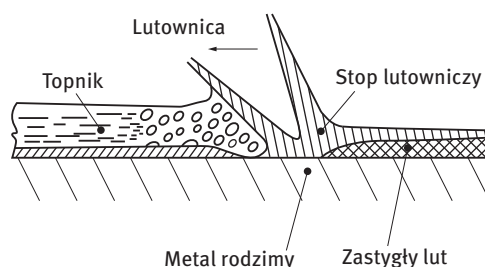
Lutowanie lutem miękkim

Do lutowania stali nierdzewnych stosuje się dwa typy stopów lutowniczych, czysty stop cyny o temperaturze topnienia około 230°C oraz stop cyny ze srebrem o temperaturze topnienia 215-225°C (rys. 3.2.3). Stale austenityczne o zawartości 18%Cr - 9%Ni dobrze lutują się lutem miękkim, podczas gdy stale ferrytyczne o zawartości 17%Cr wymagają wstępnego przygotowania powierzchni. Dla stabilizowanych tytanem lub niobem gatunków stali austenitycznych jak i ferrytycznych, lutowanie lutem miękkim jest trudniejsze bez odpowiedniego przygotowania powierzchni. Stan wykończenia powierzchni ma decydujący wpływ na zjawiska zwilżalności podczas lutowania. Powierzchnie po trawieniu (1 lub 2D) nadają się lepiej do lutowania niż powierzchnie polerowane (2B) lub szczególnie powierzchnie po wyżarzaniu bez nalotu (2R), tablica 4.1.2.

Lutowanie lutem miękkim zazwyczaj wykonuje się za pomocą elektrycznej lutownicy, lecz także można stosować nagrzewanie palnikiem acetylenowo-tlenowym. Proces lutowania wymaga zastosowania odpowiedniego topnika,

który w przypadku stali nierdzewnych nie może zawierać chlorków, które negatywnie wpływają na ich własności korozyjne. Topniki oparte na kwasie ortofosforowym zapewniają uzyskanie odpowiednich własności lutu i ponadto są wolne od chlorków. Po lutowaniu powierzchnia stali musi być dokładnie oczyszczona z pozostałości topnika.

W celu uzyskania najlepszej jakości połączeń lutowanych ze stali austenitycznych lub ferrytycznych należy stosować elementy o odpowiedniej chropowatości powierzchni. Produkty lutowane są często stosowane na pokrycia dachowe i elementy wyposażenia dodatkowego w budownictwie i dzięki walorom estetycznym (matowy wygląd) są chętnie stosowane przez architektów.



Rys. 3.2.3. Zasada lutowania lutem miękkim

Tablica 3.2.1 - Główne stopy lutownicze stosowane dla stali nierdzewnych.

Klasyfikacja wg ASTM - AWS	Oznaczenie wg EN 1044	Stężenie masowe pierwiastków, %									Temperatura lutowania (°C)	Metal rodzimy*			
		Ag	Cu	Ni	Zn	Cr	Si	Sn	Cd	Inne		A	F	M	
B _{Ag} 1	Ag 302	45	15		16						24	620 / 730	X		
B _{Ag} 1 a	Ag 301	50	15,5		16,5						18,0	630 / 760	X		
B _{Ag} 4		40	30	2	28							780 / 900	X		X
B _{Ag} 13		54	40	1	5							860 / 970	X	X	X
B _{Ag} 21		63	28,5	2,5							6	800 / 900	X	X	X
B _{Ag} 26		25	38	2	33						Mn=2	800 / 900	X		
B _{Ni} 1	Ni 101				74,1	14	4,0				B=3,4 Fe=4,5	1070 / 1200	X		
B _{Ni} 2	Ni 102				82,4	7	4,5				B=3,1 Fe=3,0	1010 / 1180	X	X	
B _{Ni} 5	Ni 105				71	19	10					1070 / 1200	X	X	

* Stal A: austenityczna, F: ferrytyczna, M: martenzytyczna.

3.3 Klejenie

Wprowadzenie

Technika klejenia może być stosowana do wzmacniania połączeń wykonanych śrubami, nitami, nitowkrętami, itd., jak również samodzielnie do łączenia cienkich blach ze stali nierdzewnych, gdzie nie można wpływać na zmianę wyglądu zewnętrznego powierzchni. Operacje klejenia nie wpływają na zmianę geometrii złączy oraz przemiany strukturalne w stopach metali, a prawidłowo zaprojektowane złącza klejone charakteryzują się wysoką wytrzymałością zmęczeniową. W szczególnych przypadkach warstwa kleju może również zapewniać izolację cieplną i elektryczną, a także absorbować wibracje obniżając poziom

hałasu. Zastosowanie klejenia często umożliwia znaczące obniżenie masy elementów, co jest szczególnie korzystne w przemyśle transportowym. Złącza wytwarzane tą technologią charakteryzują się niższą wytrzymałością w porównaniu do złączy lutowanych lub spawanych, a ich temperatura pracy jest ograniczona zazwyczaj do około 200 °C oraz wykazują pewną wrażliwość na wilgoć. Prawidłowe wykonanie złączy klejonych jest uzależnione od właściwego przygotowania łączonych powierzchni.

Główne grupy klejów

Klej jest produktem złożonym, w którym każdy komponent ma specyficzną funkcję (plastyfikatora, utwardzacza, rozpuszczalnika). Składniki

te są mieszane w określonych proporcjach w celu uzyskania odpowiedniej kombinacji własności.

Podział ze względu na stan skupienia

Kleje mogą występować w formie ciekłej, past, proszków, taśm, folii, itd.

Kleje płynne

Kleje tego typu często występują w formie rozpuszczonej i muszą być poddane suszeniu. W tym przypadku są dostarczane w formie organicznych lub wodnych roztworów lub też jako emulsja. Mogą występować również, jako jedno- (1K) lub dwu- składnikowa (2K) żywica utwardzana na zimno lub na gorąco.

Pasty i masy uszczelniające

Produkty takie są jedno- (1K) lub dwuskładnikowymi (2K) żywicami, które zapewniają właściwą przyczepność i uszczelnienie złącza po wysuszeniu i usieciowieniu kleju (to znaczy utwardzeniu).

Kleje w formie proszku lub granulatu

Produkty takie w temperaturze otoczenia występują w formie stałej i uzyskują odpowiednie własności spajające po podgrzaniu.

Kleje w formie taśm i folii

Kleje w formie taśm i folii dostępne są jako jedno i dwustronne, w których syntetyczne podłoże jest nasycone klejem z jednej lub dwóch stron. Alternatywnie, samo spoiwo

klejące może być przeniesione z podłoża na łączone powierzchnie stali lub też cała taśma może być poddana polimeryzacji pod wpływem temperatury.

Podział ze względu na mechanizm utwardzania

Zgodnie z tą klasyfikacją można wyróżnić trzy podstawowe typy klejów: termoutwardzalne, termoplastyczne i utwardzane na zimno (elastomery zalicza się do ostatniej grupy).

Kleje termoutwardzalne

W tych produktach, kinetyka utwardzania jest bardzo powolna w temperaturze pokojowej jednak zostaje znacznie przyśpieszona przez podgrzanie lub dodanie utwardzacza bezpośrednio przed użyciem. Zalicza się do nich fenoplasty (tworzywa fenolowe) epoksydy (epoksyd z poliamidami, nylonem, silikonem, polisulfidy), akryle (cyjanoakryle, anaeroby i akryle modyfikowane), aminoplasty (mocnikowo-aldehydowe).

Kleje termoplastyczne

Kleje termoplastyczne miękną po podgrzaniu i twardnieją podczas chłodzenia, a reakcja ta jest odwracalna w przeciwieństwie do materiałów termoutwardzalnych. Zalicza się do nich spoiwa bazujące na octanie etyleno-winylowym i winylo-etylenie, organicznych rozpuszczalnikach (neoprenie i innych gumach bazujących na elastomerach poliuretanowych) oraz kleje rozpuszczalne w wodzie (winyłowe, akrylowe, epoksydowe i poliestrowe).

Masy uszczelniające

Produkty te ulegają polimeryzacji (utwardzają się) w kontakcie z wilgocią zawartą w atmosferze. Zalicza się do nich silikony i poliuretany.

Adhezja

Mechanizm adhezyjny

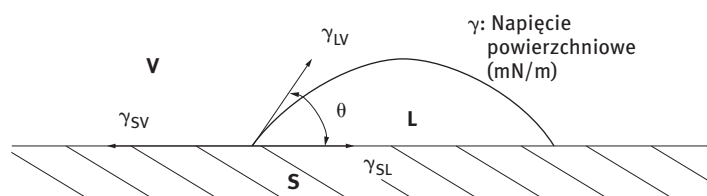
Mechanizm adhezji jest opisywany teoriami mechaniki, elektroniki, dyfuzji, termodynamiki i chemii, ale żadna z nich oddzielnie nie wyjaśnia wszystkich aspektów tego zjawiska. Jednak to mechaniczna teoria adhezji

uwzględniająca zazębianie się cząstek spoiwa i mikronierówności wraz z termodynamiczną teorią sił Van der Waals'a jest najlepszym zobrazowaniem tego zjawiska obserwowanego w praktyce.

Zwilżalność powierzchni

Podstawowym warunkiem uzyskania dobrego połączenia powierzchni jest dostateczna zwilżalność podłoża przez klej. Zdolność zwilżania powierzchni przez klej zależy od napięcia powierzchniowego kleju (γ_a) i podłoża (γ_s), a także napięcia powierzchniowego rozdziału faz – między klejem i podłożem (rys.

3.3.1). W praktyce dla właściwego zwilżania powierzchni przez klej (to znaczy aby swobodnie się po niej rozchodził to $\theta \rightarrow 0$ i $\cos \theta \rightarrow 1$), napięcie powierzchniowe podłoża musi być większe od napięcia powierzchniowego kleju zgodnie ze wzorem $\gamma_s > \gamma_a$.



S: Podłoże (ciało stałe) – V Gaz (pary kleju) – L Ciecz (klej)

γ_{LV} : Napięcie powierzchniowe ciekłego kleju w równowadze z jego parami (mN/m)

γ_{SV} : Napięcie powierzchniowe podłoża w równowadze z parami kleju (mN/m)

γ_{SL} : Napięcie powierzchniowe na granicy ciekłego kleju i podłoża (mN/m)

Równanie Younga: $\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta$

Kąt zwilżania: $\theta < 90^\circ \rightarrow$ dobre zwilżanie podłoża przez klej

Rys. 3.3.1 - Schemat zwilżalności powierzchni przez spoiwo.

Procedury łączenia

Przygotowanie powierzchni

W celu ułatwienia procesu łączenia z powierzchni należy usunąć wszystkie substancje, które chemicznie lub fizycznie mogłyby zmniejszyć jej zwilżalność. Obróbka powierzchni powinna nawet zwiększyć jej zwilżalność. Efekt ten uzyskuje się przez ob-

róbkę mechaniczną taką jak piaskowanie, szlifowanie lub obróbkę chemiczną: trawienie, utlenianie anodowe, a także ich kombinacje na przykład piaskowanie z nanoszeniem podkładu do gruntowania powierzchni.

Nanoszenie kleju na podłoże

Stosowane techniki nanoszenia klejów na podłoże zależą od fizycznych i chemicznych własności kleju. Klej na powierzchnię może być наносzony za pomocą wata lub pędzla,

przez rozpylanie oraz wylewanie bezpośrednio na powierzchnię.

Łączenie

Polega na złączeniu ze sobą klejonych powierzchni, podczas którego należy szczegól-

nie unikać powstawania nieciągłości w nałożonej warstwie kleju.

Utwardzanie lub suszenie

Klej może zastygnąć lub utwardzić się w różny sposób, w tym w temperaturze pokojowej lub pod wpływem podgrzania. W obu przypadkach

bez udziału lub pod wpływem działania nacisku, a także w wyniku oddziaływania promieni ultrafioletowych w temperaturze pokojowej.

Zalety zastosowania klejenia dla stali nierdzewnych

Klejenie jest przydatną techniką łączenia elementów ze stali nierdzewnych, która nie wpływa na zmianę struktury stali ani geometrię złącza i, co najważniejsze, nie zmienia wyglądu zewnętrznego elementów. Należy jednak pamiętać, że wytrzymałość połączeń otrzymanych tą techniką jest niższa od złączy spawanych lub lutowanych. Z tego względu naprężenia ścinające złącza klejonych wynoszą od 1 do 30 N/mm², podczas gdy w przy-

padku złączy spawanych około 500 N/mm² bez względu na kierunek naprężeń. Z tej przyczyny złącza klejone stosuje się do wytwarzania połączeń na zakładkę, gdzie obciążenie zostaje rozłożone na wystarczająco dużą powierzchnię umożliwiając ograniczenie naprężeń. Ponadto, złącza takiego typu są dla bezpieczeństwa poddawane wyłącznie działaniu naprężeń tnących.

Przygotowanie powierzchni stali nierdzewnej

Warstwa pasywna na powierzchni stali nierdzewnej złożona jest głównie z tlenków i wodorotlenków żelaza i chromu, ale może być także zanieczyszczona różnymi innymi cząstkami, które będą szkodzić w osiągnięciu

wysokiej adhezji. Z tego względu konieczne jest prawidłowe przygotowanie powierzchni, które zapewni dobrą zwilżalność przez klej (zobacz część „Zwilżalność powierzchni”).

Mechaniczne przygotowanie powierzchni

Celem mechanicznych metod obróbki powierzchni jest zwiększenie jej chropowatości i polepszenie połączenia między elementami klejonymi. Jest to efektywne jedynie w przypadku, gdy klej dostatecznie dobrze zwilża obrobione powierzchnie. Do najczęściej stosowanych metod mechanicznego przygotowania powierzchni należy: piaskowanie, gdzie środkiem ściernym są cząstki krzemionki lub

korundu w płynie wyrzucane pod ciśnieniem (suche powietrze) lub szlifowanie za pomocą taśm ściernych lub ściernic. W tym przypadku czynnikiem ściernym jest zarówno aluminium (korund), węgiel krzemu (karbokorund), lub cyrkon (tlenek cyrkonu). W celu usunięcia z powierzchni wszystkich pozostałości ścierniwa należy ją odtłuścić rozpuszczalnikiem (1-1-1 trójchloroetan).

Czyszczenie

Odtłuszczenie w gorących kąpielach alkalicznych

Kąpiele te usuwają z powierzchni stali nierdzewnej pozostałości obcych materiałów. Wskazane jest mieszanie kąpeli, co zwiększa efektywność jej działania. Po procesie odtłuszczenia powierzchnię stali należy koniecznie splotkać strumieniem czystej wody.

gdy są stosowane w formie oparów, ponieważ ciecz, która kondensuje na powierzchni jest zawsze najczystsza. Podczas czyszczenia z użyciem tkaniny – musi być biała, należy ją wymienić na nową w momencie nawet lekkiego zabrudzenia. Jeżeli czyszczenie odbywa się przez zanurzenie w kąpeli z rozpuszczalnikiem to zasadniczym czynnikiem jest kontrola jej czystości. Kąpiel powinna zawierać bardzo niewielki udział tłuszczów lub ich całkowity brak. Po czyszczeniu z powierzchni stali należy usunąć wszystkie osady stosując deterenty wraz z obfitym splotaniem czystą wodą.

Odtłuszczenie rozpuszczalnikami

Głównymi rozpuszczalnikami do odtłuszczenia stali są trójchloroetylen i 1-1-1 trójchloroetan. Najlepsze oddziaływanie środki te uzyskują,

Trawienie z kolejnym utlenianiem anodowym

Po trawieniu w kąpeli kwasowej wykonuje się utlenianie anodowe (anodyzowanie) w kwasie azotowym lub w mieszaninie kwasów siarkowego i chromowego.

Obróbka chemiczna

Trawienie w kąpielach kwasowych

Ten rodzaj obróbki został opisany szczegółowo w części „Kąpiele trawiące”. Kąpiele trawiące są najczęściej oparte na bazie mieszaniny kwasu azotowego i fluorowodorowego.

Wyniki testów laboratoryjnych dla różnych klejów

W warunkach laboratoryjnych wykonuje się badania wytrzymałości na ścinanie złączy klejonych. Badania uwzględniały jedynie zniszczenie kohezyjne złącza, to znaczy w przypadku zniszczenia samego kleju w odróżnieniu do zniszczenia adhezyjnego, które następuje na granicy metal/klej. Badania wykonano na próbkach z austenitycznej stali nierdzewnej typu X5CrNi18-10/1.4301 z wykończeniem powierzchni 2B i chropowatości od 0,03 do 0,2 μm . W celu ułatwienia spajania powierzchni stali pokryto gruntem epoksydowym modyfikowanym akrylem.

Klej akrylowy utwardzony w temperaturze pokojowej (minimum przez 20 minut) wykazuje wytrzymałość na ścinanie około 13 N/mm² dla warstwy spoiwa o grubości 200 μm , bez względu na sposób przygotowania powierzchni. Dla kleju poliuretanowego utwardzanego w temperaturze pokojowej (minimum przez 2 godziny pod obciążeniem lub przez 48 godzin bez

dodatkowego obciążenia) dla warstwy spoiwa o grubości 200 μm wytrzymałość na ścinanie wynosi 12 N/mm², dla powierzchni wstępnie gruntowanej, a w przypadku braku gruntowania wytrzymałość wynosi około 2 N/mm² dla tego typu klejów. Dla klejów epoksydowych wytrzymałość na ścinanie spoiwa o grubości 200 μm jest równa około 30 N/mm². Czas potrzebny do utwardzenia takich spoiw w temperaturze pokojowej wynosi od 48 godzin do kilku dni, można go jednak zredukować do kilkudziesięciu lub nawet kilku minut podwyższając temperaturę utwardzania do 100-170 °C.

W przypadku mas uszczelniających (poliuretanów i silikonów) wytrzymałość na ścinanie zawiera się w przedziale od 1 do 3 N/mm² dla czasu utwardzania od 2 do 4 tygodni w temperaturze pokojowej. Tego rodzaju materiały można stosować do wykonywania spoin o grubości przekraczającej 1 mm.

Projektowanie złączy klejonych

- a) W celu wykonania złącza klejonego o właściwej wytrzymałości podczas eksploatacji zasadniczą rolę odgrywa jego prawidłowe zaprojektowanie w taki sposób, aby na spoinę oddziaływało jedynie obciążenie tnące lub ściskające, lecz nigdy w wyniku niecentrycznego rozciągania lub oddzierania. Przed oddzieraniem krawędzi złącza można się ustrzec stosując odpowiedni naddatek na zakładkę.
- b) Powierzchnia złącza klejonego musi być tak obliczona, aby równomiernie rozkładać występujące obciążenia i

zminimalizować poziom naprężeń. Dla wysoko wytrzymałych klejów, wymiar zakładki może być ograniczony do wielkości 15-30 razy grubości każdego z łączonych elementów. Dla innych klejów wartość ta jest 100 razy wyższa. Poniższy wzór empiryczny służy do wyznaczenia wielkości zakładki elementu klejonego l w mm:

$$l = Y \times t / \tau$$

gdzie: t – grubość materiału podłoża (mm), Y – granica plastyczności materiału podłoża (N/mm²), τ – wytrzymałość na ścinanie spoiwa (N/mm²).

Dla materiału podłoża o grubości 0,5 mm ze stali nierdzewnej typu X5CrNi18-10/1.4301 ($Y = 320 \text{ N/mm}^2$) łączonego klejem o wytrzymałości na ścinanie wynoszącej 20 N/mm^2 wymiar zakładki wynosi $l = 320 \times 0,5 / 20 = 8 \text{ mm}$.

c) Grubości materiału podłoża i warstwy kleju muszą być także zoptymalizowane pod względem własności wytrzymałościowych w celu przystosowania warunków geometrycznych złącza do obciążeń eksploatacyjnych, unikając zjawiska

rozrywania złącza. Jeżeli złącze jest poddane obciążeniom dynamicznym, jego wytrzymałość musi być około czterech razy wyższa od poziomu naprężeń dynamicznych. W przypadku klejów o wysokiej wytrzymałości grubość warstwy kleju powinna wynosić około 0,2 mm. W przypadku niektórych elastycznych klejów, szczególnie w formie mas uszczelniających, ich grubość zazwyczaj wynosi około 2 mm.

Przykładowe zastosowania

Płyty wielowarstwowe ścian osłonowych

Takie panele są zazwyczaj złożone z blachy zewnętrznej, z austenitycznej stali nierdzewnej klejonej do aluminiowego rdzenia o strukturze plastra miodu. Elementy po połączeniu muszą być idealnie płaskie i w tym momencie uwidacznia się zaleta zastosowania metody klejenia.

Powierzchnię blach ze stali nierdzewnej przygotowuje się do montażu przez piaskowanie lub pokrycie podkładem gruntującym, a następnie pokrywa klejem poliuretanowo-epoksydowym i skleja dodatkowo dociskając na zimno oraz na gorąco.

Pokrycia ścian

Znakomite własności stali nierdzewnych pod względem łatwości czyszczenia i sterylizacji sprawiają, że znajdują one szerokie zastosowanie na elementy „czystych pomieszczeń” (o zastrzonych wymaganiach, co do czystości i sterylności). Panele ze stali o strukturze

austenitycznej idealnie nadają się do łączenia przez klejenie do płaskich elementów konstrukcyjnych ze stali węglowych stosując kleje epoksydowe utwardzające się w temperaturze pokojowej.

Zastosowania dekoracyjne – pomniki

W celu wykonania łatwych w czyszczeniu podłóg o dobrej odporności na ścieranie i atrakcyjnym wyglądzie, często stosuje się blachy z austenitycznej stali nierdzewnej o wzorzystym wykończeniu powierzchni, które

są klejone do drewnianych paneli (ze sklejk lub płyty pilśniowej), a także bezpośrednio do betonowych płyt. Taki typ złącza jest poddawany obciążeniu przez ściskanie i do jego wykonania stosuje się kleje na bazie naopre-

nu (na przykład kleje kauczukowe), których zaletą jest możliwość stosowania i utwardzania w temperaturze pokojowej

W przypadku budowy dużych konstrukcji – pomników, głównie ze stali nierdzewnej typu X5CrNi18-10/1.4301 stosuje się dwie różne techniki budowy. Pierwsza polega na wykonaniu samonośnej konstrukcji spawanej z płyt stalowych. Wymaga to wytrawienia i pasywacji w strefach wpływu ciepła po spa-

waniu oraz polerowania całej powierzchni dla uzyskania jednorodnego wyglądu. Kolejna technika budowy polega na zastosowaniu szkieletu stalowego z rur i kształtowników, do którego montowane są stalowe płyty – konieczne z jednego gatunku stali. Wierzchnie płyty są często montowane przy użyciu nitów, ale obecnie można je również mocować za pomocą klejów poliuretanowych utwardzanych w temperaturze pokojowej.

Zastosowanie w przemyśle transportowym

W tym sektorze do najczęstszych zastosowań należą:

- Drzwi wagonów kolejowych, składające się z dwóch paneli ze stali austenitycznej, których wewnętrzna powierzchnia styku jest wypolerowana przed aplikacją kleju - polimeru epoksydowego. Po dopasowaniu paneli do wnętrza wtłaczana jest pianka poliuretanowa i klejenie odbywa się pod naciskiem na gorąco.
- Nadwozia autobusów. Obecnie wielu producentów autobusów w

celu wydłużenia czasu eksploatacji i ograniczenia kosztów do produkcji nadwozi stosuje stalowy szkielet wykonany z rur i różnych kształtowników z ferrytycznej stali nierdzewnej typu X2CrNi12/1.4003, a także stali austenitycznej X5CrNi18-10/1.4301. Do stalowego szkieletu klejone są panele z materiałów kompozytowych. Głównie stosuje się kleje na bazie poliuretanu, a klejenie odbywa się pod naciskiem w temperaturze pokojowej.

Zastosowania medyczne

Do głównych zastosowań medycznych należą:

- Igły podskórne. Igły ze stali nierdzewnej wytwarza się z cienkich rurek przez głębokie tłoczenie do wymaganej średnicy otworu. Po odcięciu na wymaganą długość igły i ukosowaniu jednej z końcówek, druga jest klejona do szklanej rurki lub elementu z poliwęglanu lub polimetakrylanu. Do klejenia takich elementów stosuje się „medyczny” akryl, który utwardza się pod wpływem promieniowania ultrafioletowego w temperaturze pokojowej.
- Protezy biodrowe. Implanty biodrowe składają się z kulistej główki wykonanej często z wytapianej próżniowo wysoko molibdenowej stali austenitycznej. Implant jest łączony z kością udową cementem opartym na metakrylanie metylu. Zaletą stali nierdzewnej jak i zastosowanego spoiwa jest ich wysoka biotolerancja w bezpośrednim kontakcie z płynami fizjologicznymi.

3.4 Połączenia mechaniczne

Wprowadzenie

Metody łączenia mechanicznego inne niż spawanie, lutowanie i klejenie stosowane dla stali węglowych można bez trudu zastosować dla blach ze stali nierdzewnej. W tym przypadku należy zwrócić szczególną uwagę, aby żadna z powierzchni złącza nie była podatna na korozję elektrochemiczną. W celu przeciwdziałania takiemu zjawisku, elementy połączenia najlepiej wykonać z tego samego gatunku stali

nierdzewnej lub przynajmniej z równoważnych gatunków.

Połączenia gwintowe

Śruby i wkręty ze stali nierdzewnych wytwarza się ze wszystkich głównych gatunków tych stopów. Tam gdzie wymagana jest wysoka wytrzymałość stosuje się stale martenzytyczne o 13% stężeniu Cr. Stale ferrytyczne zawierające 17% Cr stosuje się tylko w przypadku łagodnych środowisk korozyjnych. Zwiększenie odporności korozyjnej w środowisku zawierającym chlorki można uzyskać przez zastosowanie stali z dodatkiem 1-1,5% molibdenu. Najwyższą odporność korozyjną zapewniają gatunki austenityczne (stopy Fe-Cr-Ni) i szczególnie gatunki zawierające dodatek molibdenu.

Do produkcji śrub i wkrętów stosuje się trzy procesy technologiczne: obróbkę skrawaniem, wytłaczanie przez kucie na zimno i wytłaczanie na gorąco (kucie matrycowe). W przypadku obróbki skrawaniem, w celu zwiększenia wydajności stosuje się często gatunki stali automatowej. Ze stali nierdzewnej produkuje się taki sam asortyment elementów złącznych jak z klasycznych stali węglowych, a większość z nich stanowią śruby z sześciokątnym łbem, wkręty z rowkiem i krzyżowe, wkręty samogwintujące, śruby dwustronne, sześciokątne nakrętki oraz podkładki.

Śruby i wkręty ze stali nierdzewnych dostarcza się w stanie po pasywacji, co zapewnia dobrą odporność korozyjną. Najwyższe własności wytrzymałościowe posiadają elementy złączne wytwarzane przez wytłaczanie na zimno.

Zdjęcie 8: Elementy złączne. Do łączenia stali nierdzewnych należy stosować elementy złączne takie jak np. śruby i wkręty również ze stali nierdzewnych.



Połączenia nitowe

Nitowanie stali nierdzewnych zwykle wykonuje się w temperaturze pokojowej (nitowanie na zimno) stosując nity o maksymalnej średnicy do 5mm. Głównie stosuje się nity ze zwykłym łbem

kulistym, nity drażone i nity jednostronne, używane wszędzie tam, gdzie istnieje dostęp tylko do jednej części łączonych elementów. Połączenia nitowe należy tak projektować, aby na nit oddziaływały raczej siły ścinające niż siły rozciągające.

Klinczowanie

Wykonywanie połączeń przez przetłaczanie (klinczowanie) w niektórych przypadkach może być alternatywą dla technik łączenia za pomocą nitów lub zgrzewania punktowego (rys. 3.4.1). Technologia ta może być z powodzeniem stosowana dla stali nierdzewnych dzięki ich wysokiej plastyczności. Klinczowanie jest procesem formowania na zimno, więc nie dochodzi do zmian strukturalnych ani utleniania powierzchni obrabianych elementów. Podobnie jak podczas nitowania, łączone blachy muszą na siebie zachodzić, co może powodować powstanie przestrzeni, w których wystąpi korozja szczelinowa. Można temu zapobiec łącząc technikę klinczowania z klejeniem i w ten sposób uzyskać hermetyczne połączenie elementów. Ponadto obecność kleju w złączu zapewnia połączeniu zdolność do tłumienia drgań.

W praktyce połączenia klinczowe wykonuje się zarówno za pomocą przenośnych urządzeń hydraulicznych, jak i pras stacjonarnych składających się ze stempla i matrycy. W przypadku pras stacjonarnych kształt stempla jest zazwyczaj okrągły, a dla pras przenośnych zarówno okrągły i kwadratowy.

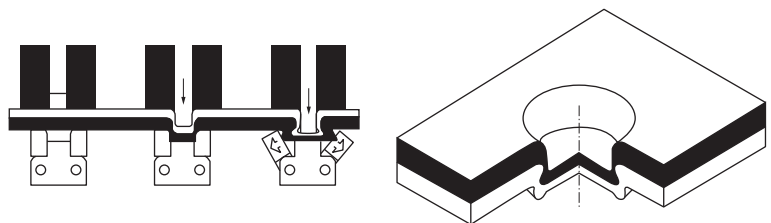
Technikę łączenia przez klinczowanie stosuje się do wytwarzania wielu różnych elementów, w tym elementów samochodowych układów wydechowych z blachy typu X6CrTi12/1.4512 do grubości 1,5 mm wraz z elementami wytwarzanymi z bla-

chy o grubości 1mm ze stali X6Cr17/1.4016 i X5CrNi18-10/1.4301. Dla danej grubości blachy przyjmując, że siła wbijania stempla wymagana dla stali węglowej wynosi F , to dla ferrytycznej stali nierdzewnej X6Cr17/1.4016 siła $F = 1,5 \times F$, a dla austenitycznej X5CrNi18-10/1.4301 $F = 2 \times F$.

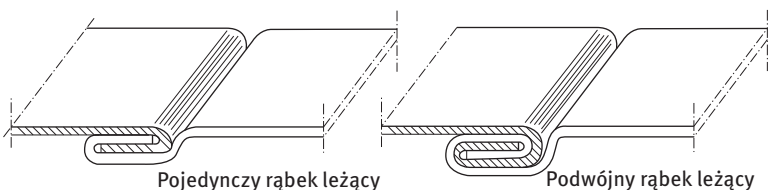
Łączenie na rąbki

Technika łączenia blach na rąbki odbywa się przez mechaniczne zagięcie jednej lub obu krawędzi łącznych blach o kąt 180° w celu uzyskania szczelnego szwu. Metoda wymaga kolejnych operacji zaginania blach lub częściowej walcowania przez szereg odpowiednich narzędzi (rys. 3.4.2). Tak jak dla klinczowania tą metodą można łączyć ze sobą różne materiały. Na przykład głęboko

Rys. 3.4.1- Zasada łączenia przez klinczowanie.



Rys. 3.4.2 - Łączenie blach na zakładkę.



łótczone elementy z nierdzewnej stali austenitycznej typu X5CrNi18-10/1.4301 można łączyć z relatywnie trudno odkształcalnymi elementami ze stali ferrytycznej gatunku X6Cr17/1.4016, których odporność korozyjna będzie wystarczająca dla planowanego środowiska użytkowania. Takie postępowanie może znacznie wpłynąć na obniżenie kosztów pod warunkiem, że zostanie uwzględnione w fazie projektowania produktu.

W przeciwieństwie do powszechnego przekonania, zastosowanie łączenia blach na rąbki umożliwia uzyskanie całkowicie szczelne-

go połączenia. W przypadku wątpliwości, co do jakości wykonania złącza jego szczelność można zwiększyć stosując dodatkowe zakładki (rąbki) lub kleje.

Technika łączenia blach na rąbki dzięki dużej szybkości wdrażania technologii i wysokiej opłacalności produkcji znalazła szerokie zastosowanie w wytwarzaniu sprzętu gospodarstwa domowego, gdzie elementy nie są poddawane wysokim obciążeniom mechanicznym.

Połączenia rozłtaczane

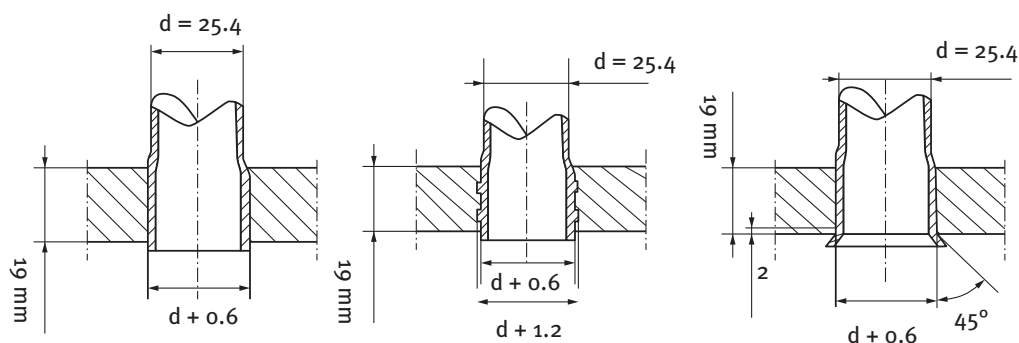
Rozłtaczane połączenia rurowe są stosowane do sztywnego i hermetycznego utwierdzenia rur wymienników ciepła w otworach ścian sitowych kotłów (rys. 3.4.3). Oprzyrządowanie do rozłtaczania składa się ze stożkowego trzpienia oraz osadzonych na nim pierścieni uszczelniających. Obrotowy trzpień jest wprowadzany w zakończenie rury powodując jej rozszerzenie na zewnątrz. Moment obrotowy trzpienia zwiększa się wraz ze wzrostem stopnia rozłtaczania i dąży do granicy, która umożliwia kontrolowanie grubości rozłtaczanej rurki przez ogranicznik obrotu. Początkowa szczelina między zewnętrzną średnicą rury a średnicą otworu zawiera się w zakresie od 0,2 mm dla małych średnic rur do 0,4 mm dla rur o średnicy większej od 30 mm.

Stosuje się trzy główne układy połączeń:

- rozłtaczanie rury w gładkim otworze, co zapewnia możliwość wymiany rury,
- rozłtaczanie rury w rowkowanym otworze, co uniemożliwia wymianę rury,
- rozłtaczanie rury w gładkim otworze z rozszerzeniem rury u wylotu.

W szczególnych przypadkach operacja rozłtaczania rur jest dodatkowo zakańczana przez spawanie metodą TIG, ale takie połączenie obu technologii jest raczej niezalecane. Połączenia wykonywane przez rozłtaczanie rur wykazują całkowitą szczelność do zakresu ciśnienia wewnętrznego na poziomie 50 bar i maksymalnej temperatury 150 °C.

Rys. 3.4.3 - Łączenie rur przez rozłtaczanie (wszystkie długości w mm).



4 Stan powierzchni

4.1 Charakterystyka powierzchni

Wprowadzenie

Zgodnie z rozdziałem 1.5, istnieje szeroka gama technologii wykończenia powierzchni w zależności od pożądanych funkcji użytkowanych elementów. Tak ogromna różnorodność dotyczy przede wszystkim produktów płaskich, tj. blach oraz taśm, dla których jakość powierzchni ma bardzo istotne znaczenie. Wygląd powierzchni, a zwłaszcza jej trwałość, ściśle zależy od odporności na korozję. Dostępne wykończenia powierzchni stosowane w przemyśle uzyskuje się w wyniku:

- a) bezpośredniej obróbki, na przykład „po wyżarzaniu i trawieniu”,
- b) grawerowania mechanicznego bezpośrednio podczas operacji walcowania, powodującego uzyskanie wzoru lub tekstury na powierzchni taśmy ze stali nierdzewnej przez jeden lub dwa walce.
- c) Usuwania materiału z użyciem taśm lub tarcz ściernych. Ten rodzaj obróbki może być stosowany do taśm w kęgach oraz pojedynczych arkuszy blachy.



Zdjęcie 9: Instalacja pasteryzacji mleka

Charakterystyka stanu powierzchni

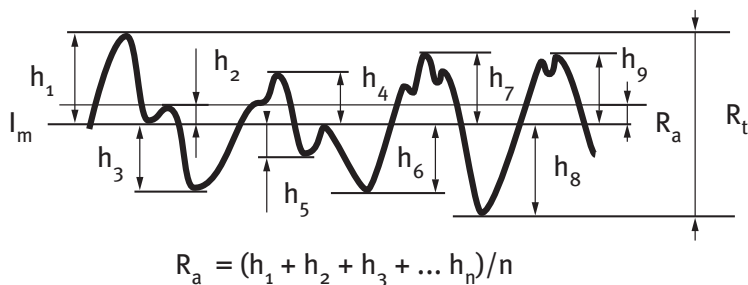
Pomimo, że wygląd zewnętrzny powierzchni jest częściowo oceniany subiektywnie, to w celu scharakteryzowania go oraz uzyskania powtarzalności w procesie produkcji należy

zastosować „obiektywne” techniki badawcze. Najczęściej do tego celu stosuje się pomiary chropowatości oraz współczynnika odbicia światła.

Chropowatość

Przyrządy pomiarowe do oceny chropowatości umożliwiają zapis mikrogeometrii powierzchni w dwóch lub trzech wymiarach. Zarejestrowany profil (rys. 4.1.1) stosuje się do obliczenia średniej chropowatości R_a oraz maksymalnej wysokości chropowatości R_t .

Parametr R_a stanowi średnią arytmetyczną wszystkich odchyłeń profilu od linii środkowej profilu I_m . Maksymalna wysokość chropowatości R_t stanowi największą amplitudę przebiegu zmierzoną na całej długości odcinka elementarnego.

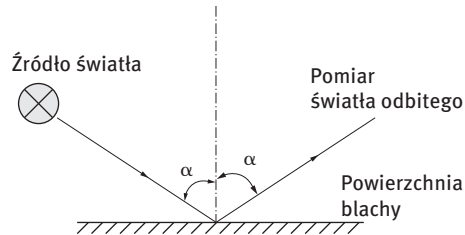


Rys. 4.1.1 - Określenie średniej chropowatości R_a oraz maksymalnej wysokości chropowatości R_t

Współczynnik odbicia światła

Współczynnik odbicia światła powierzchni (jasność powierzchni) wyznacza się przez pomiar intensywności wiązki światła odbitej od analizowanej powierzchni i przedstawia, jako funkcję intensywności oraz kąta padającej wiązki promieni (rys. 4.1.2). W tabelicy 4.1.1 podano typowe wartości współczynnika odbicia światła dla dwóch popularnych

wykończeń powierzchni ferrytycznych i austenitycznych stali nierdzewnych.



Rys. 4.1.2 - Pomiar współczynnika odbicia światła.

Oznaczenie europejskie EN 10088-2		Współczynnik odbicia światła (jednostki bezwymiarowe)	
Znak	Numer	2B (wyżarzanie, trawienie, walcowanie wykańczające)	2R (wyżarzanie bez nalotu, walcowanie wykańczające)
Stal austenityczna			
X5CrNi18-10	1.4301	20 – 30	50 – 55
Stal ferrytyczna			
X6Cr17	1.4016	50 – 55	56 – 60

Tablica 4.1.1 - Typowe wartości współczynnika odbicia światła dla stali nierdzewnych w różnym stanie wykończenia powierzchni.

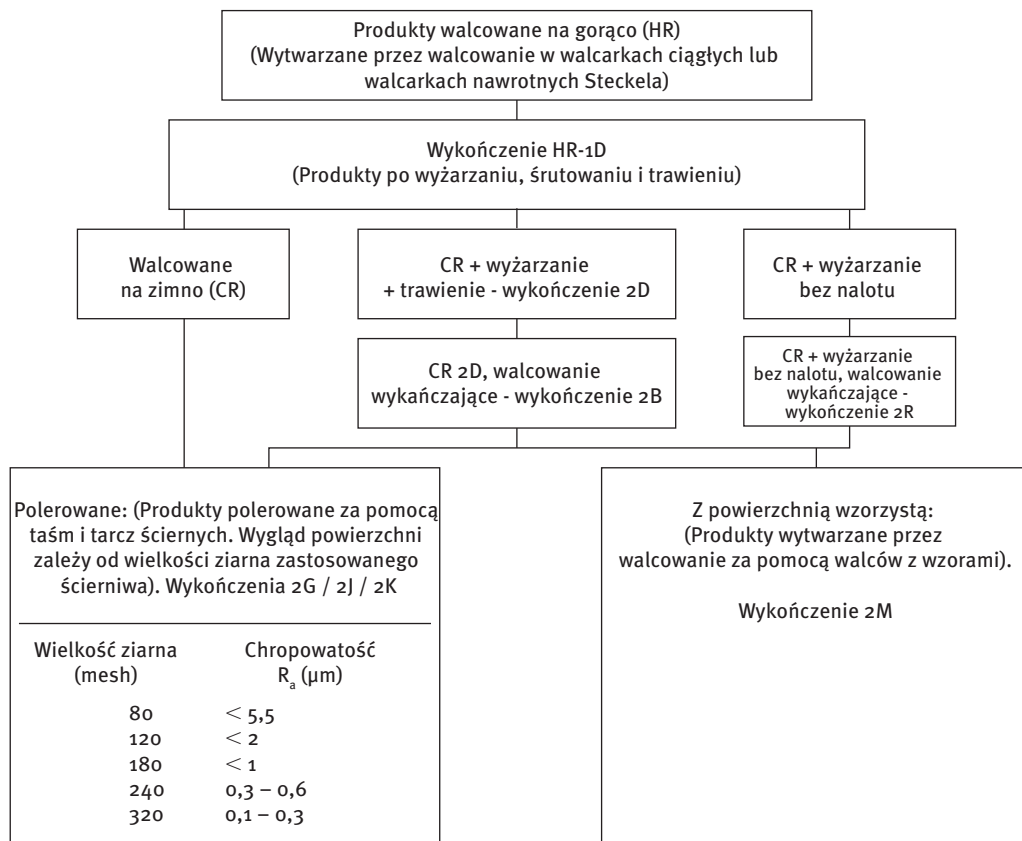
Główne wykończenia powierzchni

W tabelicy 4.1.2 przedstawiono różnorodność dostępnych wykończeń powierzchni, które należy analizować w wraz z tablicą 1.5.1 (część 1.5), opisującą etapy procesu wytwarzania produktów płaskich ze stali nierdzewnej. Produktem początkowym jest taśma walcowana na gorąco w walcierce ciągłej lub nawrotnej Steckela. Taśma taka jest wyżarzana, czyszczona strumieniem śrutu oraz trawiona w celu uzyskania produktu walcowanego na gorąco typu (HR), którego wykończenie powierzchni jest zgodne z nr 1, oznaczanym jako 1D zgodnie z normą EN 10088-2. Następnie produkt HR z wykończeniem 1D poddany jest serii operacji walcowania na zimno na walcierce Sendzimira, zazwyczaj z jedną lub kilkoma operacjami wyżarzania. Dla produktów wal-

cowanych na zimno (CR) wyróżnia się trzy rodzaje wykończeń:

- Wykończenie 2D: CR + wyżarzanie + trawienie,
- Wykończenie 2B: CR + wyżarzanie + trawienie + walcowanie wykańczające,
- Wykończenie 2R: CR + wyżarzanie bez nalotu (w atmosferze redukującej z następnym walcowaniem wykańczającym na zimno).

Przepust wykańczający polega na walcowaniu w walcierce dwuwalcowej w wyniku, którego uzyskuje się nieznaczne wydłużenie materiału. Ponieważ walce posiadają wykończenie na połysk lustrzany, walcowanie wykańczające skutkuje w lepszej gładkości oraz wyższym współczynnikiem odbijania światła przez powierzchnię.



Tablica 4.1.2 - Główne typy wykończeń powierzchni produktów płaskich ze stali nierdzewnych.

Taśmy produkowane w ten sposób często są następnie polerowane materiałem ściernym o odpowiedniej wielkości ziarna, aby uzyskać pożądaną wykład (zwykle matowy lub połyskujący), którego jednoznaczna ocena jest zazwyczaj subiektywna. Polerowanie taśmą ścierną dobrze nadaje się do obróbki powierzchni płaskich. W celu uzyskania wykończenia matowego stosuje się szczotki z naturalną lub syntetyczną szczecinią. Polerowanie przy użyciu taśm ściernych mocowanych na dysku powoduje powstawanie małych zarysowań i ułatwia retusz wykończenia powierzchni. Wykończenia na połysk lustrzany uzyskuje się stosując polerowanie za pomocą filcowej tarczy polerskiej, typowo o średnicy 200-300 mm, z prędkością obwodową ok. 2000 m/min.

Poza polerowaniem mechanicznym z użyciem taśm i tarcz ściernych, stali nierdzewne mogą być polerowane elektrolitycznie. Elektropolowanie stosowane jest głównie w przypadku części, których kształt uniemożliwia ich polerowanie mechaniczne. Przedmiot obrabiany zanurzany jest w kąpeli elektrolitu, w której staje się anodą. Skład elektrolitu może różnić się w zależności od konfiguracji procesu i generalnie wyróżnia się ich trzy główne typy: roztwory kwasu fosforowego, mieszaniny kwasu cytrynowego i siarkowego oraz mieszaniny kwasu glikolowego i siarkowego. W zależności od rodzaju kąpeli, gęstość prądu wynosi od 8 do 65 A/dm², napięcie od 2 do 12 V, a temperatura procesu od 60 do 90 °C.

4.2 Przygotowanie i obróbka powierzchni

Młotkowanie

Młotkowanie, tak jak inne operacje strumieniowo ściernie, polega na wystrzeliwaniu z dużą prędkością, za pomocą dyszy, strumienia twardych cząstek o średnicy od 0,15 do 0,6 mm w kierunku obrabianej powierzchni. Stosowane cząstki mają bardziej lub mniej kształt kulisty i nie są ściernie. Prędkość wystrzeliwania cząstek oraz czas ich oddziaływania na powierzchnię muszą być zoptymalizowane dla otrzymania pożądanego efektu końcowego. Większa wielkość cząstek oraz ich wyższa prędkość zwiększa chropowatość powierzchni, która spada wraz z wydłużeniem czasu procesu.

Młotkowanie powoduje silne umocnienie warstwy wierzchniej materiału, nawet do grubości 0,3 mm. Naprężenia ściskające występujące w warstwie wierzchniej mogą korzystnie oddziaływać na wytrzymałość zmęczeniową. W ten sposób operacja młotkowania wydłuża czas eksploatacji wykończonych elementów.

Jeżeli po młotkowaniu nie można wykonać dekontaminacji powierzchni to do młotkowania należy unikać stosowania bogatych w że-



lazo cząstek wykonanych z innych materiałów niż stal nierdzewna.

Młotkowanie stanowi często efektywne przygotowanie powierzchni przed malowaniem.

Zdjęcie 10: Wykańczanie powierzchni. W celu spełnienia wymagań technicznych dostępna jest szeroka gama wykończeń powierzchni – np. polerowanie lustrzane.

Piaskowanie i piaskowanie kulkami szklanymi

W operacji piaskowania, cząstki ściernie (krzemionka, aluminium, itd.) kierowane są na przedmiot obrabiany przy użyciu strumienia (powietrza lub wody) pod wysokim ciśnieniem. W przypadku piaskowania kulkami

szklanymi cząstki mają postać małych, nie ściernych szklanych kulek. Proces ten jest szczególnie przydatny do wywarzania gotowych elementów o skomplikowanym kształcie i jednorodnym wyglądzie.

Szlifowanie tarczą ścierną

W procesie tym obrabiana powierzchnia jest ścierna przy użyciu tarczy ścierniej obracającej się z wysoką prędkością, typowo między 20 a 80 m/s. Cząstki ściernie są głównie wykonane

z aluminium (korund) lub węglika krzemu (karborund) a rzadziej z węglika boru lub diamentu. Do szlifowania zgrubnego, np. zmniejszania grubości złączy spawanych, stosuje się cylindryczne

tarcze o średnicy 100-200 mm i wielkości ziarna ok. 40 mesh. W zależności od rodzaju lepiszcza, prędkość obrotowa wynosi 25 - 60 m/s. Dla szlifowania wykańczającego (np. wyrównywania

wykańczającego spoin), stosuje się półsztywne lub elastyczne tarcze ściernie o średnicy 150-250 mm i wielkości ziarna 80 - 320 mesh z prędkością obrotową 12 - 15 m/s.

Polerowanie¹⁾

Polerowanie jest najczęściej stosowaną operacją wykańczania powierzchni, która została już opisana w części na temat głównych operacji obróbki powierzchniowej oraz w tablicy 4.1.2. Celem stosowania polerowania dla gotowych elementów jest często przywrócenie oryginalnego wyglądu wybranych obszarów np. spoin. W innym przypadku, dla przyborów kuchennych lub naczyń, celem może być nadanie produktowi końcowemu matowego lub błyszczącego wyglądu, którego nie można było uzyskać bezpośrednio po operacji tłoczenia lub w innych operacjach formowania. We wszystkich przypadkach zastosowane na-

rzędzia muszą być przeznaczone wyłącznie do obróbki stali nierdzewnych, aby uniknąć ryzyka zanieczyszczenia powierzchni przez cząstki żelaza.

W porównaniu do innych materiałów polerowanie stali nierdzewnych wymaga zastosowania większej energii. Należy więc zachować ostrożność, aby zbytnio nie nagrzać powierzchni stali, co powoduje nieznaczne utlenienie powierzchni i utrudnia powstawanie warstwy ochronnej. Nacisk wywierany przez taśmę lub tarczę ścierną musi być ustalony na możliwie jak najniższym poziomie, który zapewni zadowalające ścierania bez lokalnego przegrzania powierzchni.

Obróbka chemiczna²⁾

Trawienie wstępne lub kondycjonowanie zgorzeliny

Po niektórych operacjach obróbki, w atmosferze utleniającej, zgorzelina powstała na powierzchni jest zbyt gruba i gęsta, aby ją usunąć przez zwykłe wytrawianie w kwasie. W takich warunkach można zastosować trzy rodzaje trawienia wstępnego:

- Zanurzenie na ok. 15 minut w kąpeli roztopionej sody kaustycznej, zawierającej od 5 do 20% sodu lub azotanu potasu, o temp. 450 °C.

- Zanurzenie na ok. 15 minut w roztopionym roztworze składającym się z 85% sody kaustycznej, 14% sodu lub azotanu potasu oraz 1% chlorku sodu, o temp. 485 °C.
- Zanurzenie na kilka minut w roztopionym roztworze sody kaustycznej oraz 1 do 2% wodorku sodu, o temp. 380 °C

Niezależnie od wybranej metody kolejnym etapem powinno być zanurzenie i sputkanie w zimnej wodzie a następnie wytrawianie w kwasie.

¹⁾ Zagadnienie zostało szczegółowo opisane w publikacji Euro Inox: VAN HECKE Benoît, Mechaniczne wykończenia powierzchni dekoracyjnych ze stali nierdzewnej (Seria: materiały i zastosowania, zeszyt 6), Luxemburg: Euro Inox, 2005

²⁾ Zagadnienie zostało szczegółowo opisane w publikacji Euro Inox: CROOKES, Roger, Wytrawianie i pasywacja stali nierdzewnej (Seria: materiały i zastosowania, zeszyt 4), Luxemburg: Euro Inox, 2004

Wytrawianie w kąpielach kwaśnych

Wytrawianie w kąpielach kwaśnych usuwa zgorzelinę tlenkową powstałą na powierzchni podczas operacji obróbki w wysokiej temperaturze, w atmosferze utleniającej, w tym również podczas spawania. Trawienie może być wykonywane na kilka sposobów, ale naj-

częściej odbywa się przez zanurzenie w kwasie. Dla ferrytycznych i austenitycznych stali nierdzewnych stosuje się mieszaniny kwasu azotowego i fluorowodorowego lub kwas siarkowy. Typowy skład oraz warunki obróbki podano poniżej.

a) Kąpiele azotowo-fluorowodorowe

- 62% kwas azotowy (40° Baume) : 200 litrów
- 65% kwas fluorowodorowy : 10 litrów lub fluorek sodu : 15 kg
- Woda : 800 litrów
- Temperatura : 50-60 °C
- Czas trwania : ok. 15 minut

b) Kąpiele kwasu siarkowego

- 90% kwas siarkowy : 100 litrów
- 35% kwas chlorowodorowy : 50 litrów
- Woda : 900 litrów
- Temperatura : 50-55 °C
- Czas trwania : ok. 15 minut

Dla austenitycznych stali nierdzewnych, stosowane są także kwaśne kąpiele azotowo-fluorowodorowe lub kąpiele kwasu siarkowego, lecz o innym składzie.

a) Kąpiele azotowo- fluorowodorowe

- 62% kwas azotowy (40° Baume) : 200 litrów
- 65% kwas fluorowodorowy : 20 litrów lub fluorku sodu : 30 kg
- Woda : 800 litrów
- Temperatura : 50-60 °C
- Czas trwania : ok. 15 minut

b) Kąpiele kwasu siarkowego

- 90% kwas siarkowy : 100 litrów
- Woda : 900 litrów
- Temperatura : 60 °C
- Czas trwania : kilka minut

Pasywacja

Stale nierdzewne wystawione na oddziaływanie powietrza ulegają pasywacji w sposób naturalny, lecz czas do tego potrzebny jest zależny od rodzaju atmosfery. Aby umożliwić szybkie odbudowanie warstwy pasywnej

po wytrawieniu, wykonuje się pasywację powierzchni w kąpielach kwasowych o następującym składzie oraz warunkach obróbki.

Dla *ferrytycznych i martenzytycznych stali nierdzewnych*:

- 62% kwas azotowy (40° Baumego) : 500 litrów
- Woda : 500 litrów
- Temperatura : około 20 °C
- Czas trwania : ok. 30 minut

Dla *austenitycznych stali nierdzewnych*:

- 62% kwas azotowy (40° Baumego) : 250 litrów
- Woda : 750 litrów
- Temperatura : około 50 °C
- Czas trwania : ok. 15 minut

Dekontaminacja

Zabieg dekontaminacji jest podobny do pasywacji, lecz stosuje się go w innym celu. Podczas różnych operacji obróbki, powierzchnia elementów ze stali nierdzewnej może ulec zanieczyszczeniu przez łatwo utle-

niające się cząstki bogate w żelazo, których obecność może zapoczątkować proces korozji. Usunięcie tego typu zanieczyszczeń jest podstawowym celem dekontaminacji.

Obróbka wykańczająca spoin

Obróbka wykańczająca stosowana dla spoin jest podobna do zabiegów opisanych powyżej i ma

na celu nadanie złączom spawanym odporności na korozję, jaką posiada materiał rodzimy.

Konserwacja powierzchni*

Stale nierdzewne są stosowane ze względu na dobrą odporność korozyjną, która związana jest z długim okresem eksploatacji oraz trwa-

łością wyglądu powierzchni. Niemniej jednak, powierzchnię należy okresowo czyścić w celu usunięcia nagromadzonych zanieczyszczeń.

Środki czyszczące

Produkty ogólnego zastosowania

Do czyszczenia stali nierdzewnych można stosować większość środków czyszczących. Ponieważ zazwyczaj ich dokładny skład nie jest znany, to po czyszczeniu powierzchnię stali należy obficie spłukać czystą wodą.

ją się produkty do mycia okien. Niezależnie od użytego środka, po czyszczeniu powierzchnię należy obficie przemyć czystą wodą.

Detergenty i mydła

Do czyszczenia można stosować większość domowych detergentów oraz mydeł. W czyszczeniu okresowym szczególnie dobrze sprawdza-

Proszki i gąbki ścierne

Produkty te mogą być przydatne do ścierania bardzo silnie przylegających zanieczyszczeń. Zwykle jednak wpływają na jasność powierzchni i jej wygląd. Z tego powodu należy stosować łagodne pasty i mlecza czyszczące. We wszystkich

* Zagadnienie zostało szczegółowo opisane w publikacji Euro Inox: Czyszczenie i konserwacja architektonicznych elementów ze stali nierdzewnej, Luxemburg: Euro Inox, 2003

przypadkach użyte proszki powinny być wolne od tlenków żelaza. Po czyszczeniu należy zawsze obficie spłukać powierzchnię czystą wodą. Dla powierzchni polerowanych, ścieranie powinno odbywać się równoległe do rys polerowania.

Rozpuszczalniki

Użycie rozpuszczalników jest czasem konieczne do usunięcia z powierzchni bardzo odpornych osadów. Ogólnie, do tego celu można stosować wszystkie dostępne rozpuszczalniki, a ich pozostałość należy obficie spłukać czystą wodą.

Środki czyszczące na bazie kwasów

Zastosowanie środków na bazie kwasów powinno mieć miejsce wyłącznie w szczególnych przypadkach i być zgodne z prawidłowymi procedurami (np. usuwanie zgorzeliny lub kamienia kotłowego). Istnieją produkty na bazie kwasu fosforowego lub azotowego specjalnie przeznaczone dla stali nierdzewnych, natomiast zastosowanie środków zawierających kwas chlorowodorowy jest ściśle zabronione. Wszystkie ślady kwasu należy usunąć obficie spłukując powierzchnię czystą wodą.

Środki czyszczące na bazie alkaliów

Roztwory wodorotlenku sodu oraz potasu generalnie dobrze nadają się do czyszczenia

Metody czyszczenia

Zastosowania dekoracyjne oraz w budownictwie

Wyróżnia się trzy różne rodzaje operacji czyszczenia, odpowiadające etapom przekazania do eksploatacji, okresowej konserwacji oraz renowacji.

Czyszczenie podczas przekazania do eksploatacji

Podczas składowania oraz przenoszenia na placu budowy, elementy ze stali nierdzewnej

stali nierdzewnych. Po ich użyciu powierzchnię także należy obficie spłukać czystą wodą.

Środki dezynfekujące

Zimny rozcieńczony podchloryn może być stosowany ze szczególną ostrożnością, ale użycie gorącego podchlorynu, nawet znacznie rozcieńczonego jest surowo zabronione. Czas kontaktu metalu z roztworem musi być ograniczony do minimum. W tym przypadku przemyć powierzchnię czystą wodą jest jeszcze bardziej zalecane niż po użyciu innych produktów.

Woski ochronne

Najlepszą ochroną stali nierdzewnej jest jej warstwa pasywna. Woski ochronne zapewniają dodatkową ochronę korozyjną, lecz często mogą być kłopotliwe ze względu na zatrzymywanie na powierzchni zanieczyszczeń.

Kompatybilność ze stalami nierdzewnymi

Dostępne środki czyszczące nie są identyczne pod względem ich kompatybilności ze stalami nierdzewnymi. Użytkownicy muszą, zatem dokładnie sprawdzać u dostawcy czy dany produkt jest przewidziany do czyszczenia danego typu stali nierdzewnej.

zwykle są zabezpieczane przez zdzieralną folię ochronną, którą usuwa się przed przekazaniem konstrukcji do eksploatacji. Jeżeli pokryta folią powierzchnia wystawiona jest na oddziaływanie promieni słonecznych, to czas takiej ekspozycji nie może przekroczyć 6 miesięcy. Po usunięciu folii powierzchnie należy utrzymywać w czysto-

ści, szczególnie jeżeli wciąż wykonywane są prace montażowe. W razie przypadkowego zabrudzenia, należy wykonać czyszczenie odpowiednim środkiem czyszczącym wraz z obfitym spłukaniem elementów czystą wodą.

Czyszczenie w ramach okresowej konserwacji

- **Powierzchnie zewnętrzne:** Czyszczenie konserwacyjne jest zwykle wykonywane za pomocą standardowych detergentów niezawierających chloru w formie proszków, płynów lub mydeł. Czyszczenie powinno odbywać się za pomocą gąbki a następnie powierzchnia powinna być obficie spłukana czystą wodą. Zaleca się wytarcie nadmiaru cieczy przy pomocy „ściągaczki” z taśmą gumową, aby uniknąć powstawania zacieków po wyschnięciu.
- **Powierzchnie wewnętrzne:** Okresowe czyszczenie może odbywać się za pomocą tych samych detergentów jak dla powierzchni zewnętrznych. Jest ono jednak niewystarczające

do usunięcia odcisków palców, które wymagają użycia produktów zawierających kwas z dodatkiem środka odtłuszczającego. Do usunięcia bardzo trwałych zabrudzeń może być konieczne użycie materiałów ściernych z wełny ze stali nierdzewnej, nylonu lub podobnych materiałów. Ścieranie należy wykonywać zgodnie z kierunkiem polerowania. Użycie zwykłej wełny stalowej jest zabronione. Należy unikać rozprysków od detergentów zawierających chlor używany do mycia podłóg (np. roztworów podchlorynu i innych środków dezynfekujących). Jeżeli jednak do tego dojdzie, powierzchnia musi być natychmiast obficie spłukana czystą wodą.

Czyszczenie renowacyjne

Jeżeli długo zaniedbywano czyszczenie w ramach regularnej konserwacji, lub stal nierdzewna wykazuje oznaki korozji, to po dokładnym rozpoznaniu przyczyn niezbędne jest wykonanie odpowiedniej operacji czyszczenia.

Wyposażenie w przetwórstwie spożywczym

Metoda czyszczenia musi być dostosowana do rodzaju środka czyszczącego, który będzie mieć kontakt ze sprzętem ze stali nierdzewnej. Po czyszczeniu zwykle następuje dezynfekcja oraz obfite spłukanie czystą wodą. Niektóre środki dezynfekujące są agresywne w kontakcie ze stalami nierdzewnymi, dlatego należy dokładnie przestrzegać procedur ich stosowania. Muszą być one

zatwierdzone przez dostawcę, który gwarantuje zgodność swojego produktu z konkretnym rodzajem stali nierdzewnej. Jeżeli zostanie zaobserwowane zjawisko korozji, należy skonsultować się z producentem danego środka czyszczącego lub dezynfekcyjnego i dostawcą stali nierdzewnej, w celu wykonania odpowiedniej obróbki naprawczej zgodnie z ich zaleceniami.

Urządzenia gastronomiczne i sprzęt gospodarstwa domowego

Urządzenia gastronomiczne i sprzęt gospodarstwa domowego są zwykle czyszczone codziennie. Jeżeli czyszczenie wykonywane jest właściwie to gwarantuje długi okres użytkowania

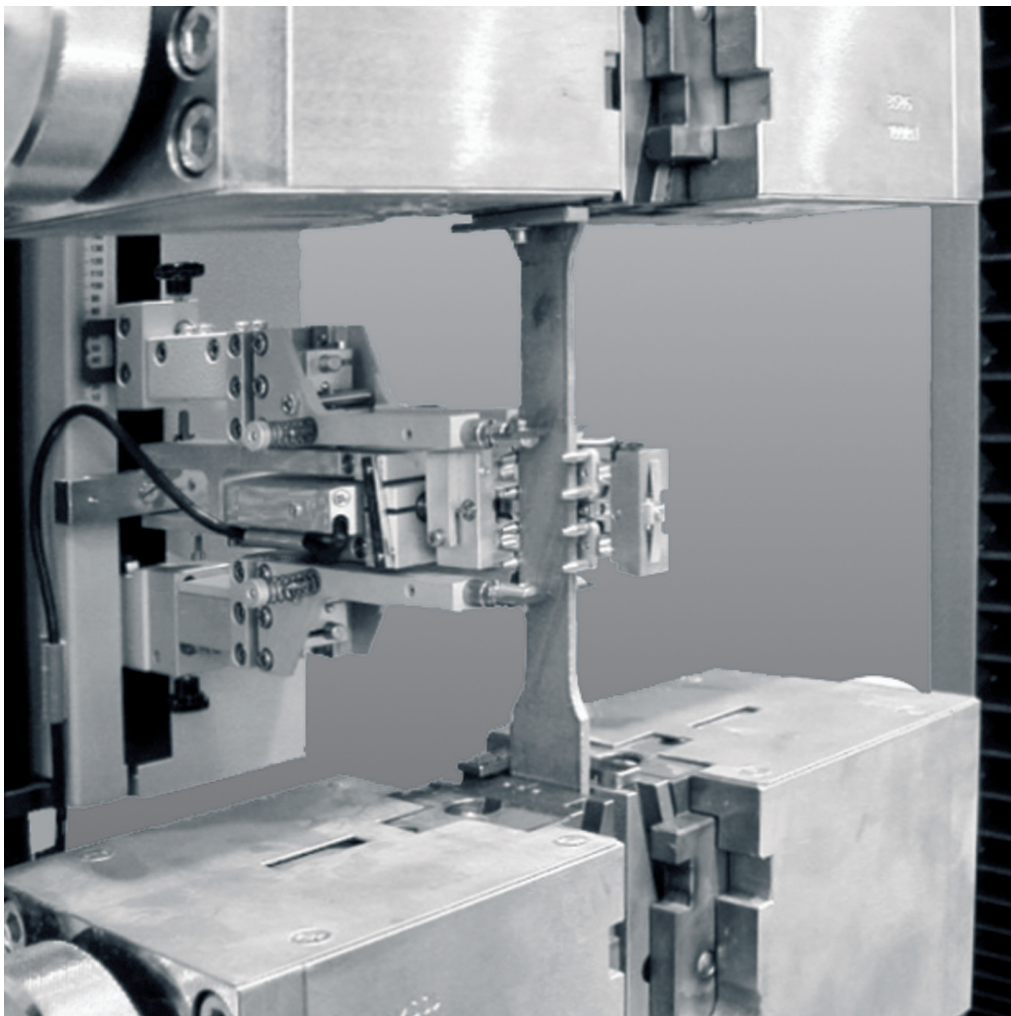
stali nierdzewnej. Produkty stosowane w tym przypadku zostały opisane w części „środki czyszczące” a środki ostrożności, które należy przestrzegać w części „metody czyszczenia”.

5 BADANIA I KONTROLA

5.1 Badania metalurgiczne

Wprowadzenie

W tej części opisano jedynie badania metalurgiczne oraz badania własności mechanicznych stali, podczas gdy techniki kontroli wymiarowej produktów ze stali nierdzewnej nie różnią się zasadniczo od metod stosowanych dla stali węglowych.



Zdjęcie 13 : Pomiar wytrzymałości: W statycznej próbie rozciągania badana próbka jest rozciągana aż do zerwania. W trakcie rozciągania rejestrowane jest naprężenie powodujące dane wydłużenie (lub odkształcenie) i na tej podstawie wykreślana jest krzywa naprężenia – wydłużenie (lub odkształcenie).

Badania metalurgiczne

W celu scharakteryzowania stopu w kategoriach metalurgicznych, niezbędne jest okre-

ślenie jego składu chemicznego oraz struktury, co stanowi cel badań metalurgicznych.

Analiza chemiczna

Termin „analiza chemiczna” jest stosowany do określenia metod wyznaczania stężenia i udziału poszczególnych pierwiastków w stali – jej składu chemicznego. Obecnie wzrasta zastosowanie metod fizycznych badania składu chemicznego ciał stałych, takich jak spektroskopia fluorescencyjna promieniowania rentgenowskiego, spektroskopia optyczna cząstek wzbudzonych wyładowaniem jarze-

niowym, optyczna spektroskopia emisyjna, szczególnie w odniesieniu do głównych pierwiastków stopowych stali (Cr, Ni, Mn, Si, itd.). Dla niektórych pierwiastków takich jak węgiel, siarka oraz azot, stosowane są specjalne metody oparte na analizie produktów spalania, które bazują na oddziaływaniu spalanych pierwiastków na absorpcję promieniowania podczerwonego.

Badania metalograficzne

Rozróżnia się badania makrograficzne przy małych powiększeniach (do $\times 50$) oraz badania mikrograficzne przy powiększeniach większych ($\times 100$ do $\times 1200$). Odczynniki

do trawienia stali stosowane do ujawniania struktury są odpowiednio dostosowane dla każdej grupy stali nierdzewnych.

Austeniczne stale nierdzewne

W celu ujawnienia ogólnej struktury tych stali, stosuje się mieszaninę wody królewskiej i gliceryny w przybliżonych proporcjach: 2 objętości kwasu chlorowodorowego, 1 objętość

kwasu azotowego oraz 3 objętości gliceryny. Czas zanurzenia zwykle wynosi około 30 sekund.

Ferrytyczne stale nierdzewne

Jednym z najczęściej stosowanych odczynników do trawienia jest odczynnik Vilella, który składa się z: 5 ml kwasu chlorowodorowego, 1g kwasu pikrynowego oraz 95 ml alkoholu etylowego. Istnieje także zmodyfikowana wersja

tego odczynnika, przeznaczona dla gatunków stali zawierających, 12% Cr, która składa się z 20 ml kwasu chlorowodorowego, 12 ml kwasu octowego, 1g kwasu pikrynowego oraz 68 ml alkoholu etylowego.

Austenityczno-ferrytyczne stale nierdzewne

Jedną z najczęściej stosowanych metod ujawniania struktury stali austenityczno-ferrytycznych jest trawienie elektrolityczne przez 10 do 30 sekund w odczynniku składającym

się z 85 % objętości kwasu azotowego - 15% objętości wody, gdzie próbka pełni funkcję anody przy napięciu jakie zapewnia gęstość prądu ok. 50 mA/cm².

5.2 Badania własności mechanicznych



Zdjęcie 14: Szybkowar

Wprowadzenie

Podobnie jak dla metali i ich stopów, własności mechaniczne stali nierdzewnych są określane za pomocą sprężystości, plastyczności oraz udarności. Sprężystość jest zdolnością materiału polegającą na powrocie odkształconego ciała do jego pierwotnej formy po zniknięciu sił wywołujących odkształcenie. Plastyczność lub ciągliwość jest zdolnością do nieodwracalnego odkształcenia pod obciążeniem bez naruszenia jego spójności (pęknięcia). W praktyce plastyczność materiałów wykorzystuje się w operacjach formowania przez gięcie lub ciągnięcie. Udarność jest miarą energii potrzebnej do złamania materiału i określa jego tendencje do wykazywania przelomu kruchego lub ciągliwego, wraz z charakterystyczną temperaturą przejścia, w której przelom zmienia się z jednego w drugi.

Udarność zwykle określana jest w udarowej próbie zginania na próbce z karbem i polega na pomiarze energii niezbędnej do jej złamania w danej temperaturze.

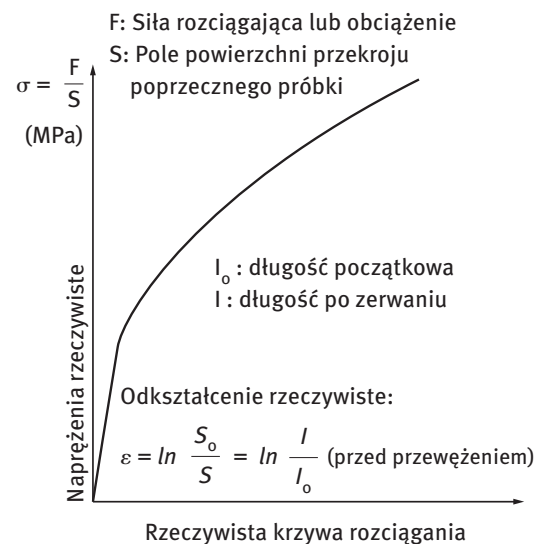
Urządzenia stosowane do badań własności mechanicznych dla stali nierdzewnych są takie same jak używane do badań zwykłych stali oraz innych metali i stopów.

Próba rozciągania

Opis badania

W statycznej próbie rozciągania, próbka rozciągana jest przy stałej prędkości i rosnącym obciążeniu. Na próbce do badań znajdują się dwa znaczniki, oddalone od siebie o początkową długość pomiarową próbki l_0 (często 80 mm). Jeżeli siła rozciągająca F działa na przekrój początkowy próbki S_0 to powstałe wydłużenie powoduje zwiększenie odległości między znacznikami z l_0 do l . Odpowiada to

odkształceniu nominalnemu lub liniowemu wyrażonemu w % jako $\varepsilon_n = 100(l - l_0)/l_0$ (dla próbki wyznaczane jako wydłużenie A), natomiast naprężenie nominalne lub rzeczywiste określa stosunek F/S_0 i jest wyrażane w N/mm^2 lub MPa. Wykres naprężenia (F/S_0) w funkcji odkształcenia (ε) jest nazywany inżynierską krzywą rozciągania i składa się z trzech głównych obszarów (rys. 5.2.1).



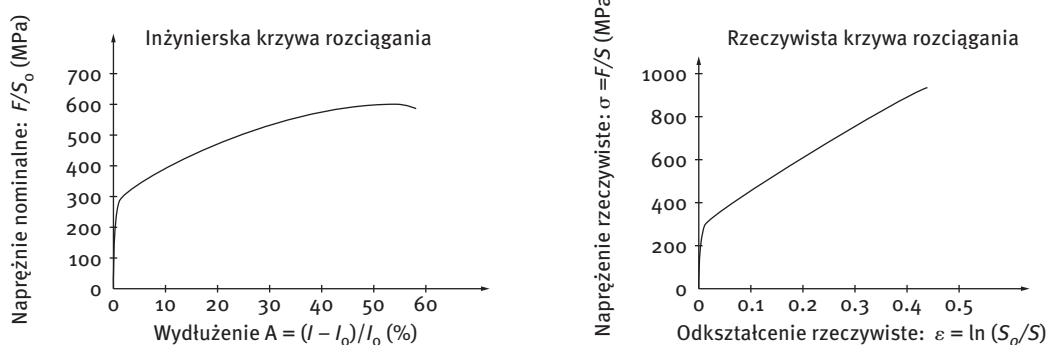
Rys. 5.2.1 - Krzywa rozciągania.

- a) Zakres sprężysty, w którym wydłużenie ϵ_n jest proporcjonalne do naprężenia. Teoretycznie, kiedy naprężenie zostaje usunięte, wydłużenie całkowicie znika. Górna granica tego liniowego obszaru sprężystego nazywana jest granicą plastyczności, R_e . Ponieważ nie zawsze można ją łatwo wyznaczyć, zwykle mierzona jest przy określonym odkształceniu trwałym 0,2% i jest nazywana umowną granicą plastyczności (w tym przypadku umowna granica plastyczności przy wydłużeniu trwałym 0,2% oznaczana jest jako $R_{p0,2}$). Granica plastyczności wyrażana jest w N/mm² (MPa).
- b) Zakres równomiernego odkształcenia plastycznego, w którym metal odkształca się równomiernie, ale naprężenie wzrasta wolniej wraz z odkształceniem i już nie w sposób liniowy. Po usunięciu naprężenia, próbka nie powraca już do długości początkowej, lecz pozostaje trwale odkształcona. Zakres ten występuje między granicą plastyczności R_e oraz największym naprężeniem znanym, jako wytrzymałość na rozciąganie R_m , również wyrażana w N/mm² (MPa).
- c) Po przekroczeniu wytrzymałości na rozciąganie odkształcenie zostaje lokalnie skoncentrowane, co powoduje powstanie przewężenia lub „szyjki” a naprężenie

określane w odniesieniu dla początkowego pola przekroju poprzecznego próbki spada aż do jej zerwania.

Naprężenie określane na podstawie inżynierskiej krzywej rozciągania jest stosowane do opisu własności mechanicznych materiałów w większości norm oraz specyfikacji technicznych. Jednak bardziej właściwym sposobem analizowania wyników próby rozciągania jest zastosowanie wartości naprężenia rzeczywistego oraz rzeczywistego odkształcenia względnego. Naprężenie rzeczywiste σ jest określane, jako stosunek przyłożonego obciążenia do pola powierzchni przekroju próbki S w danym momencie próby, tj. $\sigma = F/S$. Rzeczywiste odkształcenie względne ϵ uzyskuje się przez całkowanie dl w przedziale od l_0 do l i wyraża jako $\epsilon = \ln(S_0/S)$ ($= \ln(l/l_0)$ przed przewężeniem). Zależność ta jest związana z odkształceniem nominalnym lub inżynierskim ϵ_n następująco: $\epsilon = \ln(1 + \epsilon_n)$. Wykres zależności σ od ϵ jest rzeczywistym wykresem rozciągania (rys. 5.2.2), który może być stosowany do wyznaczenia wykładnika umocnienia n .

Na rysunku 5.2.2 przedstawiono porównanie inżynierskiej i rzeczywistej krzywej rozciągania austenitycznej stali nierdzewnej gatunku X5CrNi18-10/1.4301, która jest często stosowana na elementy głęboko tłoczone. W materiale po osiągnięciu przewężenia, naprężenie rzeczywiste rośnie aż do zerwania próbki.



Rys. 5.2.2 - Inżynierska i rzeczywista krzywa rozciągania dla austenitycznej stali nierdzewnej typu X5CrNi18-10.

Wartości charakterystyczne dla stali nierdzewnych

Różne grupy stali nierdzewnych (martenzytyczne, ferrytyczne, austenityczne, ferrytyczno-austenityczne typu duplex) podczas próby rozciągania wykazują charakterystyczne wartości mechaniczne, a występująca między nimi różnica wynika bezpośrednio z ich odmiennej struktury.

Martenzytyczne stale nierdzewne w stanie po hartowaniu i odpuszczaniu posiadają bardzo wysokie wartości R_e i R_m oraz niskie wydłużenie do zerwania A (%). W stanie zahartowanym, wartości R_e i R_m są jeszcze wyższe, a wydłużenie niższe. Zwykle uznaje się, że własności mechaniczne przy rozciąganiu w stanie zahartowanym mają niewielkie znaczenie praktyczne. W takim przypadku bardziej przydatna jest analiza struktury oraz badania twardości.

Ferrytyczne stale nierdzewne charakteryzują się krzywą rozciągania bardzo zbliżoną do krzywej dla stali węglowych. W szczególności wykazują znaczny spadek naprężeń w punkcie granicy plastyczności, poza którą naprężenia ponownie wzrastają. Górna i dolna granica plastyczności są wyraźnie widoczne na krzywej rozciągania. Wartość R_m zwykle wynosi ok. 550 N/mm² przy wydłużeniu do zerwania rzędu 30%.

Austenityczne stale nierdzewne posiadają krzywą rozciągania podobną do tej z rysunku

5.2.2. W przeciwieństwie do gatunków ferrytycznych, granica plastyczności dla stali austenitycznych nie jest wyraźnie widoczna na krzywej rozciągania i z tego względu w ich przypadku zwykle stosuje się umowną granicę plastyczności przy wydłużeniu trwałym 0,2%. Wytrzymałość na rozciąganie R_m zwykle wynosi 600 N/mm², podczas gdy wydłużenie do zerwania może przekroczyć 60%. Ta własność stali jest związana z wysokim stopniem umocnienia zgniotowego (bezpośrednio opisana wykładnikiem umocnienia n) co sprawia, że austenityczne stale nierdzewne są szczególnie podatne na głębokie tłoczenie. Ich zdolność do absorpcji energii jest jedną z najwyższych spośród powszechnie stosowanych materiałów.

Austenityczno-ferrytyczne stale nierdzewne typu duplex posiadają wysokie wartości R_e i R_m z uwagi na drobnoziarnistą dwufazową strukturę (50% ferrytu i 50% austenitu), a ich wydłużenie zawiera się średnio między wartościami dla gatunków austenitycznych i ferrytycznych. Typowo wartość R_m wynosi 800 N/mm² i wydłużenie około 35%.

Tablica 5.2.1 przedstawia typowe własności mechaniczne dla różnych grup stali nierdzewnych w różnym stanie obróbki.

Tablica 5.2.1 - Typowe własności mechaniczne różnych grup stali nierdzewnych w różnym stanie obróbki.

Typ stali	R_m (N/mm ²)	$R_{p0,2}$ (N/mm ²)	A (%)
Martenzytyczna (1)	500 – 850	270 – 500	14 – 30
Martenzytyczna (2)	1200 – 2000	1000 – 1600	2 – 10
Ferrytyczna (3)	400 – 550	250 – 380	20 – 35
Austenityczna (4)	570 – 730	215 – 360	40 – 65
Austenityczno – ferrytyczna (4)	800 – 900	620 – 750	25 – 35

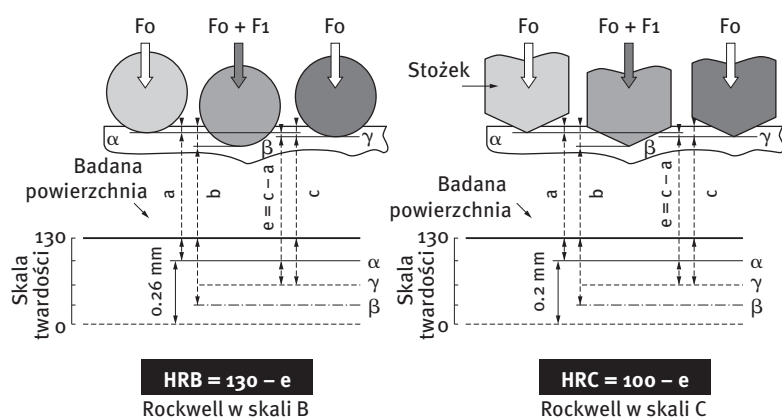
(1) Odpuszczona,
(2) Zahartowana,
(3) Wyżarzana,
(4) Przesycana i szybko chłodzona.

Pomiary twardości

Metody pomiaru

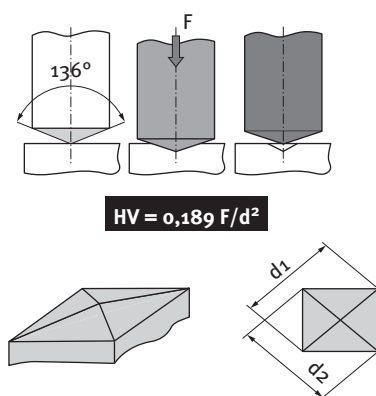
Pomiar twardości polega na wciskaniu węgelnika w płaską powierzchnię badanego materiału pod ściśle kontrolowanym obciążeniem i pomiarze rozmiaru powstałego odcisku. Do pomiaru twardości stosuje się różne rodzaje

Rys. 5.2.3 - Zasada pomiaru twardości metodą Rockwella.



Początkowo węgelnik jest obciążany siłą wstępną F_0 , co pozwala przebić się przez chropowatość powierzchni i eliminuje luzy. Następnie aplikowane jest obciążenie główne F_1 . Różnica w głębokości odcisku po ustaniu obciążenia F_1 jest miarą twardości. W tej metodzie jednostka twardości odpowiada 0,002 mm. Na rysunku zaznaczono wielkości a , b , c oraz e wyrażone w jednostkach twardości i α , β i γ wyrażone w mm.

Rys. 5.2.4 - Zasada pomiaru twardości metodą Vickersa.



Kąt wierzchołka węgelnika = 136°
 F = obciążenie w niutonach $\pm 1\%$
 d = Przekątna odcisku = $(d_1 + d_2)/2$

węglbników. W metodach Brinella i Rockwella w skali B stosuje się kulkę, natomiast w metodach Rockwella w skali C oraz Vickersa węgelnik stożkowy. W przypadku stali nierdzewnych najczęściej stosuje się trzy podstawowe metody: Rockwella w skali B, Rockwella w skali C oraz Vickersa, odpowiednio oznaczane, jako HRB, HRC i HV.

W metodzie Rockwella w skali B (rys. 5.2.3), kulka stalowa o średnicy 1/16 cala (1,59 mm) wciskana jest w badany materiał pod obciążeniem 100 kg, a następnie mierzona jest głębokość powstałego odcisku. Skala twardości Rockwella w skali B ograniczona jest do 100 HRB; dla wyższych obciążeń stosuje się metodę Rockwella C.

Metoda Rockwella w skali C (rys. 5.2.3) wykonywana jest na tym samym urządzeniu, jak w przypadku metody Rockwella w skali B, lecz z użyciem stożkowego węgelnika pod obciążeniem 150 kg i podobnie polega na pomiarze głębokości powstałego odcisku.

W metodzie Vickersa (rys. 5.2.4) stosuje się diamentowy węgelnik o kształcie ostrosłupa o podstawie kwadratu. Obciążenie może być wybrane z zakresu od 5 do 100 kg, a do badania blach ze stali nierdzewnej zwykle stosuje się wartość 5 kg. Twardość wyznaczana jest przez pomiar przekątnych powstałego odcisku.

Charakterystyczne wartości twardości dla stali nierdzewnych

W tabelicy 5.2.2 przedstawiono charakterystyczne wartości twardości dla różnych rodzajów stali nierdzewnych. W przypadku stali dwufazowych typu duplex uzyskuje się większy rozrzut wartości twardości, co jest związane z ich dwufazową strukturą zwykle złożoną w przybliżeniu z 50% austenitu i ferrytu.

Typ stali	Stan	HRB	HRC	HV
Ferrytyczna	Wyżarzony	73-85		140-180
	Obrobiony plastycznie na zimno	90-100	13-25	180-290
Ferrytyczna stabilizowana 11%Cr	Wyżarzony	67-83		120-170
Ferrytyczna stabilizowana 17%Cr	Wyżarzony	70-83		130-170
Austenityczna	Przesycony	74-88		130-185
	Obrobiony plastycznie na zimno		25-50	200-250
Austenityczno-ferrytyczna typu duplex	Przesycony	90-105		
Martenzytyczna	Zmiękczony	80-90		160-190
	Hartowany i odpuszczony		45-53	

Tablica 5.2.2 - Typowe zakresy twardości dla głównych typów stali nierdzewnych.

Próba udarności

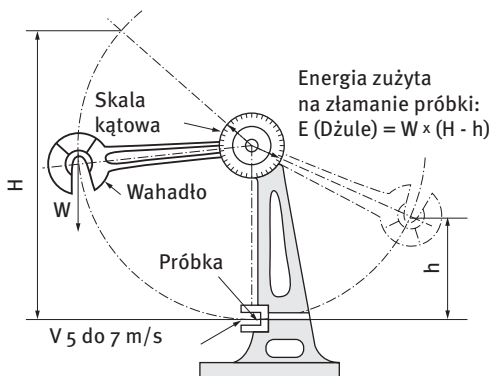
Próba udarności jest stosowana do pomiaru odporności materiału na obciążenia dynamiczne i odpowiada pracy niezbędnej do złamania próbki pod obciążeniem dynamicznym. Niska udarność jest zwykle związana z kruchym pękaniem, natomiast wysoka udarność z przełomem ciągliwym. Dla materiałów

skłonnych do kruchego pękania, zjawisko to uwidatnia się w wyniku dużej szybkości odkształcania oraz zastosowania do badań próbek z karbem. Główne parametry, które wpływają na udarność to temperatura badania, kształt karbu oraz szybkość odkształcania.

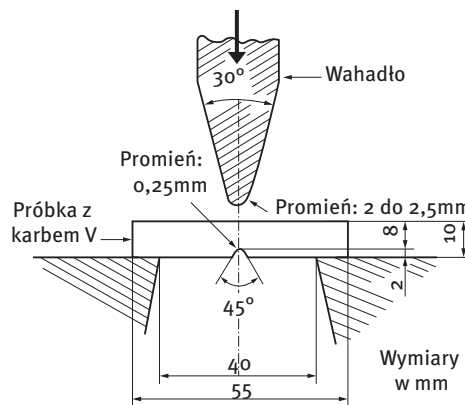
Zasada próby udarności

Urządzenia stosowane do badań stali nierdzewnych wraz z próbkami oraz kształtem karbu, są takie same jak dla stali węglowych. Najczęściej stosowaną metodą jest metoda Charpy'ego (rys. 5.2.5), w której próbka o

przekroju 10 × 10 mm, z karbem w kształcie litery V, zostaje uderzona przez swobodnie spadający młot wahadłowy. Próbka podparta jest na obu końcach od spodu oraz od czoła, z karbem umieszczonym pionowo w kierunku



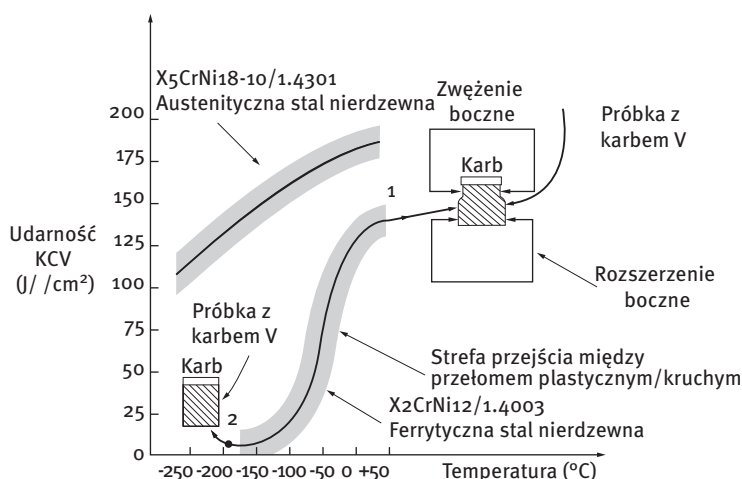
Zasada pomiaru udarności metodą Charpy'ego



Schemat mocowania próbki i jej wymiary (próbka z karbem V)

Rys. 5.2.5 - Udarowa próba zginania metodą Charpy'ego.

Rys. 5.2.6 - Wpływ temperatury na udarność próbek z karbem V. Dla stali austenitycznych temperatura badania ma relatywnie mały wpływ na udarność, podczas gdy dla stali ferrytycznych obserwuje się gwałtowne przejście między przelotem plastycznym (1) w wysokiej temperaturze i przelotem kruchym (2) w temperaturze niskiej.



Tablica 5.2.3 - Typowe wartości udarności dla różnych typów stali nierdzewnej.

Typ stali	Temperatura (°C)	Udarność KCV (J/cm²)
Martenzytyczna (X12Cr13/1.4006)	-40	35
	-60	30
	-196	8
Ferrytyczna (X6Cr17/1.4016)	-40	15
	-60	10
	-196	3
Austenityczna (X5CrNi19-10/1.4301)	-40	170
	-60	160
	-196	130
	-250	110

przeciwnym do punktu uderzenia. Wahadło powoduje złamanie próbki i następnie wznosi się na wysokość określoną przez pracę zużytą na złamanie próbki E (w dżulach) i udarność K w J/cm^2 wyrażoną jako $K = E/A$, gdzie A jest polem powierzchni przekroju poprzecznego w miejscu karbu wyrażonym w cm^2 .

Przełom może być zarówno kruchy lub ciągliwy. Przełom kruchy pociąga za sobą dekohezję lub rozłam bez znacznego odkształcenia plastycznego. W tym przypadku

powierzchnia przełomu jest jasna ze świecącymi ziarnami. Przełom ciągliwy poprzedzony jest przez znaczne odkształcenie plastyczne, powierzchnia przełomu jest matowa o wygładzie włóknistym. Zwykle materiały wykazują skłonność do kruchości w niskiej temperaturze, co jest związane z ich niską udarnością lub posiadają wysoką udarność i własności ciągliwe w temperaturze wysokiej. Zachowanie mieszane obserwuje się w obszarze przejścia między tymi dwoma strefami i jest ono charakteryzowane przez temperaturę przejścia ze stanu plastycznego w stan kruchy (rys. 5.2.6).

Udarność stali nierdzewnych

Różne typy stali nierdzewnych wykazują dość zróżnicowane wartości udarności w zależności od ich składu chemicznego oraz struktury - martenzytycznej, ferrytycznej, austenitycznej lub typu duplex (tablica 5.2.3). W przypadku złączy spawanych można zaobserwować różnice własności między metalem podłoża, strefą wpływu ciepła oraz strefą przetopienia. W gatunkach ferrytycznych wzrost udziału chromu powoduje podwyższenie temperatury przejścia w stan kruchy, zwykle o około $50^\circ C$ przy zwiększeniu zawartości chromu o 4%. Dla kontrastu, kruchy przełom zwykle nie występuje w gatunkach austenitycznych takich jak X5CrNi18-10/1.4301, które zachowują względnie stałą udarność niezależnie od temperatury badania. W tablicy 5.2.3 podano typowe wartości udarności określone w próbie sposobem Charpy'ego na próbach z karbem V w temperaturze między -40 a $-250^\circ C$.

6 Załączniki

6.1 Własności fizyczne i struktura stali nierdzewnych

Dlaczego pięć grup stali nierdzewnej ?

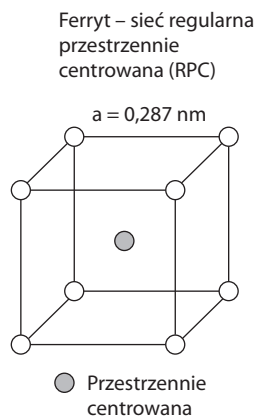
Stale nierdzewne są stopami żelaza zawierającymi minimalnie około 11 % chromu, który jest ich kluczowym pierwiastkiem stopowym. Dodatek chromu powyżej 11 % tworzy na powierzchni stali trwałą warstwę ochronną – warstwę pasywną, która stanowi ochronę przeciwkorozyjną powierzchni. Aby skutecznie zapobiegać korozji, chrom zawarty w stali musi być w pełni rozpuszczony w roztworze stałym i nie może występować w postaci węglików chromu.

Martenzytyczne stale nierdzewne

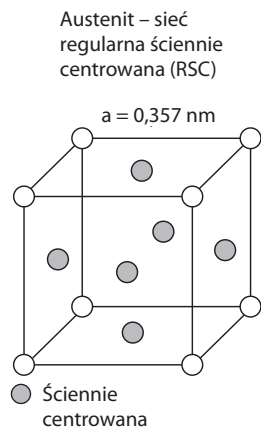
Martenzytyczne stale nierdzewne spośród wszystkich typów stali nierdzewnych zawierają najwyższe stężenie węgla (do 1,2 %), a ich własności wytrzymałościowe mogą być zwiększone w wyniku hartowania. Otrzymana struktura martenzytyczna jest strukturą magnetyczną.

Ferrytyczne stale nierdzewne

Ferrytyczne stale nierdzewne posiadają niskie stężenie węgla ($\leq 0,08\%$). Z tego względu nie wykazują znacznego utwardzenia w wyniku hartowania. Ferryt jest strukturą magnetyczną. W przypadku spawania gatunków ferrytycznych ich udarność w strefie wpływu ciepła (SWC) może być znacznie obniżona z uwagi na zbyt ni rozrost ziarna podczas spawania.



Zdjęcie 15 : Profesjonalny nóż kuchenny. Ostrze wykonane z martenzytycznej stali nierdzewnej



Żaroodporne stale nierdzewne

Chromowo niklowe gatunki tych stali wykazują wysoką wytrzymałość w wysokiej temperaturze oraz odporność na oddziaływanie atmosfer nawęglających. Stężenie chromu w tych stalach jest podwyższone do 20-25 %, natomiast stężenie niklu zawiera się w przedziale od 10 do 35 %. Wszystkie gatunki zoptymalizowane do pracy w wysokiej temperaturze posiadają wysokie stężenie węgla.

Zdjęcie 17 : Grodzie ze stali nierdzewnej typu duplex stosowane w chemikaliowcach.



Austenityczne stale nierdzewne

Stopy te są najbardziej popularne spośród wszystkich typów stali nierdzewnych z uwagi na bardzo dużą podatność na odkształcenie plastyczne i odporność korozyjną.

Stale wykazują strukturę austenityczną o sieci regularnej ściennie centrowanej z powodu dodatków pierwiastków stabilizujących fazę austenityczną, głównie niklu. Austenityczne stale nierdzewne nie utwardzają się przez hartowanie, lecz mogą być umacniane przez zgniot w wyniku obróbki plastycznej na zimno.



Zdjęcie 16 : Obudowa pompy : Wysoka plastyczność austenitycznych stali nierdzewnych sprawia, że idealnie nadają się do wytwarzania jednoelementowych części przez głębokie tłoczenie i hydroformowanie.

Austenityczno-ferrytyczne stale nierdzewne typu duplex

Struktura stali nierdzewnych typu duplex składa się z mieszaniny austenitu i ferrytu. Stale tej grupy wykazują własności charakterystyczne dla obu typów stali jednocześnie, przy wyższej wytrzymałości i ciągliwości. W porównaniu z gatunkami austenitycznymi stale nierdzewne typu duplex wykazują wyższą wytrzymałość oraz wyraźnie lepszą odporność na korozję w roztworach chlorków.

Utlenianie i tlenki

Stale nierdzewne charakteryzują się doskonałą odpornością korozyjną w atmosferach utleniających. Pierwiastkiem, który ma zasadnicze znaczenie w formowaniu wysokotemperaturowej warstwy odpornej na korozję (tak zwanej warstwy pasywnej) jest chrom. Powstały związek chemiczny to krystaliczny tlenek lub wodorotlenek.

Utlenianie jest procesem, w którym proporcje składników elektroujemnych w związku chemicznym ulegają zwiększeniu. W procesie utleniania, elektrony zostają usunięte z utlenionych związków.

Tlenek jest to związek tlenu z innym pierwiastkiem. Tlenki dzielą się na tlenki kwasowe, które reagują z zasadami i tworzą sole i tlenki zasadowe, które reagują z kwasami i tworzą sole oraz tlenki amfoteryczne wykazujące zarówno właściwości zasadowe, jak i kwasowe.

W roztworach wodnych kwas zdefiniowany jest jako substancja, która zdolna jest do tworzenia jonów wodoru podczas rozpuszczania w wodzie. Większość kwasów nieorganicznych może być traktowana, jako związki tlenków kwasowych i wody. Kiedy tlenek jest



Zdjęcie 18 : Element palnika z żaroodpornej ferrytycznej stali nierdzewnej

tlenkiem metalu może wykazywać własności amfoteryczne, zachowując się czasem jak kwas lub jak zasada.

Typowe własności fizyczne (zgodnie z EN 10088-1)

Własność fizyczna		Gatunki martenzytyczne	Gatunki ferrytyczne	Gatunki austenityczne	Gatunki austenityczno-ferrytyczne
(kg/dm ³)	Gęstość	7,7	7,7	7,9	7,8
(GPa)	Moduł sprężystości w 20° C	215	220	200	200
(10 ⁻⁶ × K ⁻¹)	Współczynnik rozszerzalności cieplnej między 20° C-200° C	10,5	10	16	13,0
(W/(m × K))	Przewodność cieplna w 20° C	30	25	15	15
(J/(kg × K))	Ciepło właściwe w 20° C	460	460	500	500
(Ω × mm ² /m)	Opór właściwy w 20° C	0,55	0,60	0,73	0,80

6.2 Rozpoznawanie i oznaczenia stali nierdzewnych

Oznaczenia europejskie

Specyfikacje europejskie stosowane w państwach Unii Europejskiej

Normy europejskie uzyskały status norm krajowych zarówno przez publikację ujednolicono tekstu normy lub przez jej uznanie, najpóźniej przed październikiem 1995.

Zgodnie z Przepisami wewnętrznymi CEN/CENELEC, następujące kraje zostały zobowiązane do wprowadzenia Norm Europejskich :

Austria, Belgia, Cypr, Dania, Estonia, Finlandia, Francja, Grecja, Hiszpania, Holandia, Irlandia, Islandia, Litwa, Luksemburg, Łotwa, Malta, Niemcy, Norwegia, Polska, Portugalia, Republika Czeska, Słowacja, Słowenia, Szwecja, Szwajcaria, Węgry, Włochy oraz Zjednoczone Królestwo Wielka Brytania i Irlandii Północnej.

Główne normy dotyczące stali nierdzewnych

Systemy oznaczania stali

EN 10027-1 Systemy oznaczania stali - Część 1 : Znaki stali

EN 10027-2 Systemy oznaczania stali - Część 2 : System cyfrowy

Normy dotyczące produktów ogólnego przeznaczenia

EN 10088-1 Stale odporne na korozję - Część 1 : Gatunki stali odpornych na korozję

EN 10088-2 Stale odporne na korozję - Część 2 : Warunki techniczne dostawy blach i taśm ze stali nierdzewnych ogólnego przeznaczenia

EN 10088-3 Stale odporne na korozję - Część 3 : Warunki techniczne dostawy półwyrobów, prętów, walcówki, drutu, kształtowników i wyrobów o powierzchni jasnej ze stali nierdzewnych ogólnego przeznaczenia

EN 10088-4 Stale odporne na korozję - Część 4 : Warunki techniczne dostawy blach grubych, blach cienkich i taśm ze stali nierdzewnych do zastosowań konstrukcyjnych

EN 10088-5 Stale odporne na korozję - Część 5 : Warunki techniczne dostawy prętów, walcówki, drutu, kształtowników i wyrobów o powierzchni jasnej ze stali nierdzewnych do zastosowań konstrukcyjnych

PN-EN 10095 Stale i stopy niklu żaroodporne

Normy dotyczące produktów przeznaczonych na urządzenia ciśnieniowe

EN 10028-7 Wyroby płaskie ze stali na urządzenia ciśnieniowe - Część 7 : Stale odporne na korozję

EN 10272 Pręty ze stali odpornych na korozję na urządzenia ciśnieniowe

EN 10216-5 Rury stalowe bez szwu do zastosowań ciśnieniowych - Warunki techniczne dostawy - Część 5 : Rury ze stali odpornych na korozję

EN 10217-7 Rury stalowe ze szwem do zastosowań ciśnieniowych - Warunki techniczne dostawy - Część 7 : Rury ze stali odpornych na korozję

EN 10222-5 Odkuwki stalowe na urządzenia ciśnieniowe - Część 5 : Stale odporne na korozję martenzytyczne, austenityczne i austenityczno-ferrytyczne

Normy dotyczące rur i elementów złącznych ogólnego przeznaczenia

EN 10296-2 Rury stalowe ze szwem o przekroju okrągłym do zastosowań mechanicznych i ogólnotechnicznych - Warunki tech-

niczne dostawy - Część 2 : Stale odporne na korozję

EN 10297-2 Rury stalowe okrągłe bez szwu dla zastosowań mechanicznych i ogólnotechnicznych - Warunki techniczne dostawy - Część 2 : Stale odporne na korozję

EN 10312 Rury ze szwem ze stali odpornej na korozję do transportu wody i innych płynów wodnych - Warunki techniczne dostawy

EN 12502-4 Ochrona materiałów metalowych przed korozją - Wytyczne do oceny ryzyka wystąpienia korozji w systemach rozprzeczania i magazynowania wody - Część 4 : Czynniki oddziałujące na stale odporne na korozję

Normy wymiarowe

EN ISO 9445 Taśmy wąskie, taśmy szerokie, blachy grube, blachy cienkie i pasy walcowane na zimno w sposób ciągły ze stali odpornej na korozję - Tolerancje wymiarów i kształtu (oficjalnie zastąpiła normę EN 12059)

Znormalizowane oznaczenia stali nierdzewnych

System oznaczania stali numerem oraz znakiem został powołany w normie EN 10027. Europejską normą dla stali nierdzewnych jest EN 10088 a przyjęty system oznaczania stali składa się z EUROPEJSKIEGO NUMERU MATERIAŁU oraz ZNAKU MATERIAŁU.

Numer materiału składa się z trzech części, na przykład 1.4301, gdzie pierwsza cyfra 1 oznacza stal, człon dwóch cyfr po kropce : 43 wskazuje grupę stali nierdzewnych (ga-

Normy dotyczące materiałów pomocniczych do spawania

EN ISO 14175 Materiały dodatkowe do spawania - Gazy i mieszaniny gazów do spawania i procesów pokrewnych

EN 760 Materiały dodatkowe do spawania - Topniki do spawania łukiem krytym - Oznaczenie

EN 1600 Materiały dodatkowe do spawania - Elektrody otulone do ręcznego spawania łukowego stali nierdzewnych i żaroodpornych - Klasyfikacja

EN ISO 14343 Materiały dodatkowe do spawania - Druty elektrodowe, taśmy elektrodowe, druty i pręty do spawania stali nierdzewnych i żaroodpornych - Klasyfikacja

EN ISO 17633 Materiały dodatkowe do spawania - Druty proszkowe i pręty do spawania łukowego bez i w osłonie gazów stali nierdzewnych i żaroodpornych – Klasyfikacja (oficjalnie zastąpiła normę EN 12073)

tunki austenityczne bez Mo, Nb lub Ti), a kolejny człon : 01 jest indywidualny dla każdego gatunku.

Znak materiału dostarcza informacji o jego składzie chemicznym, na przykład X5CrNi18-10, gdzie : X określa stal wysokostopową, 5 : 100-krotne stężenie węgla, CrNi : symbole chemiczne głównych pierwiastków stopowych, 18-10 : stężenie w % głównych pierwiastków stopowych.

Przykłady

- X20Cr13/1.4021

Stal o stężeniu węgla $20/100 = 0,2\%$ zawierająca 13 % chromu.

- X2CrTi12/1.4512

Stal o stężeniu węgla $2/100 = 0,02\%$, zawierająca 12 % chromu oraz dodatek tytanu.

- X2CrNiMo17-12-2/1.4404

Stal o stężeniu węgla $2/100 = 0,02\%$, zawierająca 17 % chromu, 12 % niklu oraz 2 % molibdenu.

- X2CrNiMoN22-5-3/1.4462

Stal o stężeniu węgla $20/100 = 0,02\%$, zawierająca 22 % chromu, 5 % niklu, 3 % molibdenu oraz dodatek azotu.

Równoważne oznaczenia gatunków – oznaczenia europejskie oraz AISI*

Numer EN	Oznaczenia europejskie	Oznaczenie AISI lub handlowe
1.4000	X6Cr13	410 S
1.4002	X6CrAl13	405
1.4003	X2CrNi12	
1.4016	X6Cr17	430
1.4028	X30Cr13	420
1.4029	X29CrS13	420 F
1.4057	X17CrNi16-22	431
1.4105	X6CrMoS17	430 F
1.4113	X6CrMo17-1	434
1.4125	X105CrMo17	440 C
1.4301	X5CrNi18-10	304
1.4303	X4CrNi18-12	305
1.4305	X8CrNiS18-9	303
1.4306	X2CrNi19-11	304 L
1.4307	X2CrNi18-9	304 L
1.4310	X9CrNi18-8	301
1.4311	X2CrNiN18-10	304 LN
1.4335	X1CrNi25-21	310 S
1.4361	X1CrNiSi18-15-4	18.15
1.4362	X2CrNiN23-4	2304
1.4372	X12CrMnNiN17-7-5	201
1.4373	X12CrMnNiN18-9-5	202
1.4401	X4CrNiMo17-12-2	316
1.4404	X2CrNiMo17-12-2	316 L
1.4406	X2CrNiMoN17-11-2	316 LN
1.4410	X2CrNiMoN25-7-4	2507
1.4434	X2CrNiMoN17-12-3	317 LN
1.4438	X2CrNiMo18-15-4	317 L
1.4439	X2CrNiMoN17-13-5	317 L4
1.4460	X3CrNiMoN27-5-2	7 Mo plus
1.4462	X2CrNiMoN22-5-3	2205
1.4466	X1CrNiMoN25-22-2	310 MoLN
1.4501	X2CrNiMoCuWN25-7-4	Zeron 100
1.4507	X2CrNiMoCuN25-6-3	Ferralium 255
1.4509	X2CrTiNb18	441
1.4510	X3CrTi17	430Ti, 439
1.4511	X3CrNb17	430Nb
1.4512	X2CrTi12	409
1.4516	X6CrNiTi12	414
1.4521	X2CrMoTi18-2	444
1.4532	X8CrNiMoAl15-7-2	PH 15.7 Mo
1.4537	X1CrNiMoCuN25-25-5	URSB8
1.4539	X1NiCrMoCu25-20-5	904 L
1.4541	X6CrNiTi18-10	321
1.4542	X5CrNiCuNb16-4	630 17.4 (PH)
1.4550	X6CrNiNb18-10	347
1.4567	X3CrNiCu18-9-4	XM 7/18.9 LW
1.4568	X7CrNiAl17-7	17.7 PH
1.4571	X6CrNiMoTi17-12-2	316 Ti
1.4580	X6CrNiMoNb17-12-2	316 Cb

*Szczegółowe informacje na temat składu chemicznego, własności mechanicznych i fizycznych stali nierdzewnych są dostępne pod adresem www.euro-inox.org/technical_tables (interaktywna baza danych) lub w wersji drukowanej broszury *Tables of Technical Properties (Materials and Applications Series, Volume 5)*, Luxembourg : Euro Inox, 2005.

6.3 Skorowidz i wykaz skrótów

Skorowidz

A

Adhezja,	96	Austenityczno-ferrytyczne stale nierdzewne	
Analiza chemiczna,	116	typu duplex,	13,14,15,18,23,117,121,126
Atmosfery „redukujące”,	12	Austenityzowanie,	20
Atmosfery „utleniające”,	11		
Austenityczne stale nierdzewne,	13,14,15, 17,22,39,116,121,126		

B

Badania metalograficzne,	116	Badania własności mechanicznych,	118
Badania metalurgiczne, 115,	116		

C

Charakterystyka stanu powierzchni,	106	Cięcie strumieniem wody,	35
Chropowatość,	106	Cięcie ściernicą,	34
Cięcie frezem,	34	Cięcie termiczne,	29, 35
Cięcie laserem,	36,37	Cięcie termiczne,	35
Cięcie łukiem plazmowym,	36	Cięcie wzdłużne,	31
Cięcie na nożycach,	30,31	Cięcie,	29
Cięcie nożycami krążkowymi,	32	Czyszczenie podczas przekazania do	
Cięcie nożycami wibracyjnymi,	33	eksploatacji,	113
Cięcie ostrzem prostym,	30, 31	Czyszczenie renowacyjne,	114
Cięcie palnikiem acetylenowo –		Czyszczenie w ramach okresowej	
tlenowym,	35	konserwacji,	114
Cięcie piłą taśmową,	35	Czyszczenie,	98

D

Dekontaminacja,	89,112	Doczołowe zgrzewanie iskrowe,	85
Detergenty i mydła,	112	Doczołowe zgrzewanie rezystancyjne,	84
Dobór gatunku stali nierdzewnej,	16	Doczołowe zgrzewanie zwarciove,	84
Dobór narzędzi,	41	Dziurkowanie,	33

E

Efekt Marangoniego, 70

F

Ferrytyczne stale nierdzewne, 13,14,15, 18,21,39,117,121,125 Frezowanie, 44

G

Gięcie ręczne,	46	Gięcie w matrycy zamkniętej,	47
Gięcie rur na gorąco,	62	Gięcie w prasach krawędziowych,	46
Gięcie rur,	57, 58	Gięcie z podkładką gumową,	48
Gięcie w hydraulicznych prasach krawędziowych,	46	Gięcie,	45
Gięcie w matrycy otwartej,	46	Grupy stali nierdzewnych,	13
Gięcie w matrycy zamkniętej z dotłaczaniem,	47	Gwintowanie,	44

H

Hydroformowanie rur, 59

J

Jezioro spawalnicze, 70,71

K

Kleje płynne,	94	Korozja lokalna,	6
Kleje termoplastyczne,	95	Korozja międzykrystaliczna,	10
Kleje termoutwardzalne,	95	Korozja naprężeniowa,	9
Kleje w formie proszku lub granulatu,	94	Korozja równomierna,	6
Kleje w formie taśm i folii,	95	Korozja szczelinowa,	8,9
Kleje,	94,97,99	Korozja wysokotemperaturowa,	11
Klejenie,	94	Korozja wżerowa,	6,7
Klinczowanie,	103	Korozja,	5
Kompatybilność ze stalami nierdzewnymi (środki czyszczące),	113	Kryteria doboru stali nierdzewnych,	16
Konwertor AOD,	24,26,27	Kryteria obróbki skrawaniem,	38

Krzywe odkształcalności granicznej,	53,54	Kształtowanie na walcarkach trójwalcowych,	49
L			
Lutowanie lutem miękkim i twardym,	90	Lutowanie lutem twardym,	90
Lutowanie lutem miękkim,	93		
Ł			
Łączenie (klejenie),	97	Łączenie,	97
Łączenie na rąbki,	103, 104		
M			
Martenzytyczne stale nierdzewne,	13,14,15, 19,20,39,121,125	Metody czyszczenia,	113,114
Masy uszczelniające,	95	Metody pomiaru twardości,	122
Mechaniczne przygotowanie powierzchni (klejenie),	98	Metody spawania,	66-88
Mechanizm adhezyjny,	96	Młotkowanie,	109
		Modelowanie i symulacja (kształtowanie na zimno),	54
N			
Nacinanie gwintów,	44	Nagrzewanie w piecu (lutowanie lutem twardym),	92
Nagrzewanie indukcyjne (lutowanie lutem twardym),	91	Nanoszenie kleju na podłoże,	97
Nagrzewanie palnikiem acetylenowo-tlenowym (lutowanie lutem twardym),	90	Normy,	128
O			
Obliczanie długości rozwinięcia kształtowanych blach,	48	Obróbka skrawaniem,	38,39
Obróbka chemiczna,	98,110	Obróbka wykańczająca spoin,	112
Obróbka cieplna po spawaniu,	23	Obróbka wykończeniowa,	89, 112
Obróbka cieplna,	20	Ochrona powierzchni (kształtowanie na zimno),	45
Obróbka eliminująca ferryt delta,	22	Odtłuszczanie rozpuszczalnikami (klejenie),	98
Obróbka plastyczna na gorąco,	61,62	Odtłuszczanie w gorących kąpielach alkalicznych,	98
Obróbka plastyczna na zimno,	45		

Opóźnione pęknięcie wytłoczki,	57	Oznaczenia stali,	128
Oprządkowanie (kształtowanie na zimno),	54		

P

Parametry spawania,	74,77,79,80,82,84,85	Powrotne odkształcenie sprężyste (sprężynowanie),	48
Pasty i masy uszczelniające,	94	Prąd spawania,	67,74,75,77,79,80,82,84
Pasty i żele do trawienia,	89	Procedury łączenia,	97
Pasty i żele pasywacyjne,	89	Proces nagrzewania (lutowanie lutem twardym),	90
Pasywacja,	89,111	Produkty długie,	27
Perforacja,	33	Produkty płaskie,	25,26
Piaskowanie i piaskowanie kulkami szklanymi,	109	Produkty ze stali nierdzewnej,	24
Piłowanie piłą ramową,	34	Projektowanie złącz klejonych,	99
Piłowanie ręczne,	34	Proszki i gąbki ściernie,	112
Piłowanie,	29,34	Próba rozciągania,	119,120
Płyty wielowarstwowe ścian osłonowych,	100	Próba udarności,	123
Pokrycia ścian (klejenie),	100	Przebijanie otworów,	29,32,33
Polerowanie,	110	Przenoszenie siłami napięcia powierzchniowego (STT),	75
Połączenia gwintowe,	102	Przesycanie	22,23
Połączenia mechaniczne,	102	Przygotowanie i obróbka powierzchni,	97,98,109
Połączenia nitowe,	103		
Połączenia rozłaczane,	104		
Pomiary twardości,	122		
Potencjał tworzenia się wżerów,	7		

R

Rezystancyjne zgrzewanie liniowe (RSEW lub SW),	83,84	Rolki zgrzewające,	86
Rezystancyjne zgrzewanie punktowe (RSW),	81,82	Rozpuszczalniki,	113
		Rury,	28
		Rysy i bruzdy podczas tłoczenia,	56

S

Siły tnące,	30	Spawanie laserowe (LBW),	87
Smarowanie (tłoczenie),	55	Spawanie łukiem krytym SAW,	77,78,79
Spawanie elektrodą topliwą w osłonie gazu obojętnego (MIG),	72,73,75	Spawanie łukiem osłoniętym elektrodą metalową (elektroda otulona) :	
Spawanie elektronowe (EBW),	88	SMAW,	80

Spawanie łukiem plazmowym PAW,	76,77	Spawanie łukowe,	66
Spawanie łukowe drutem proszkowym z rdzeniem topnikowym (FCAW),	75	Spawanie,	63
Spawanie łukowe elektrodą metalową w osłonie gazu (GMAW),	72,73,74,75	Stan powierzchni,	105
Spawanie łukowe elektrodą wolframową w osłonie gazu obojętnego (GTAW), (TIG),	66,67,68,69,70,71,74,76,77	Strefa wpływu ciepła (SWC),	36,77,124
		Struktura stali nierdzewnych,	125
		Szlifowanie tarczą ścierną,	109

Ś

Środki czyszczące na bazie alkaliów,	113	Środki czyszczące,	112
Środki czyszczące na bazie kwasów,	113	Środki dezynfekujące,	113

T

Tarciowe zgrzewanie doczołowe,	88	Trawienie wstępne lub kondycjonowanie zgorzeliny,	110
Technologie łączenia,	63	Trawienie z kolejnym utlenianiem anodowym,	98
Tłoczenie,	49,50,51,52	Twardość - charakterystyczne wartości,	122
Toczenie na tokarce,	42		
Topnik aktywujący (spawanie),	69,71		

U

Udarność stali nierdzewnych,	124	Utlenienie i tlenki,	127
Urządzenia gastronomiczne i sprzęt gospodarstwa domowego,	114	Utwardzanie lub suszenie,	97

W

Welding Research Council (WRC),	63	Wykończenia powierzchni,	107
Wiercenie,	42,43	Wykrawanie,	32
Własności fizyczne,	125, 127	Wyoblanie,	59
Własności klejów,	99	Wyposażenie w przetwórstwie spożywczym (czyszczenie),	114
Własności mechaniczne,	121	Wytaczanie i rozwiercanie,	43,44
Woski ochronne,	113	Wyłaczanie,	55,56
Wpływ wtrąceń niemetalicznych,	40	Wytrawianie w kąpielach kwaśnych,	98,111
Współczynnik odbicia światła,	107	Wytrawianie,	89
Wtrącenia siarczkowe,	40		
Wtrącenia tlenkowe,	40		

Wytrzymałość na rozciąganie stali nierdzewnych,	121	Wyżarzanie odprężające,	22
--	-----	-------------------------	----

Z

Zastosowania,	15,17,100,101,113	Zgrzewanie iskrowe (FW),	85
Zgniatanie obrotowe,	60	Zgrzewanie rezystancyjne doczołowe (UW),	84
Zgrzeina,	86	Zgrzewanie rezystancyjne,	81,84
Zgrzewanie indukcyjne prądem wysokiej częstotliwości (HFIW),	86,88	Zwilżalność powierzchni,	96

Ż

Żaroodporne stale nierdzewne,	13,14,19,126
----------------------------------	--------------

Wykaz skrótów

°C	: Stopnie Celsjusza	J	: Dżul (energia) - (jednostka metryczna)
A	: Wydłużenie (%)	K	: Współczynnik intensywności naprężeń (mechanika pękania)
AISI	: Amerykański Instytut Żelaza i Stali	kg	: Kilogram
AOD	: Proces konwertorowy AOD - odwęglanie argonowo-tlenowe (wytapianie stali)	KCV	: Udarność określona przy użyciu metody Charpy'ego (udarność)
ASTM	: Amerykańskie Stowarzyszenie Badań i Materiałów	LBW	: Spawanie laserowe (spawanie)
A-TIG	: Spawanie metoda TIG z topnikiem aktywującym (spawanie)	LCC	: Koszt cyklu życia (eksploatacji) - całkowite koszty
AWS	: Amerykańskie Towarzystwo Spawalnicze (spawanie)	LDR	: Graniczny współczynnik tłoczenia (tłoczenie)
CERMET	: Ceramiczno-metalowy materiał kompozytowy (obróbka skrawaniem)	MF	: Średnia częstotliwość (spawanie, lutowanie)
CR	: Produkt walcowany na zimno (walcowanie)	MIG	: Spawanie elektrodą topliwą w osłonie gazowej (spawanie)
CVD	: Chemiczne osadzanie z fazy gazowej (obróbka skrawaniem)	N	: Niuton (siła)
EVA	: Kopolimer etylenu z octanem winylu (klejenie)	PAW	: Spawanie łukiem plazmowym (spawanie)
FCAW	: Spawanie łukowe drutem proszkowym z rdzeniem topnikowym (spawanie)	PVD	: Fizyczne osadzanie z fazy gazowej (obróbka skrawaniem)
FW	: Zgrzewanie iskrowe (spawanie)	R _e	: Granica plastyczności (N/mm ²)
GMAW	: Spawanie łukowe elektrodą metalową w osłonie gazu (spawanie)	R _m	: Wytrzymałość na rozciąganie (N/mm ²)
GTAW	: Spawanie łukowe elektrodą wolframową w osłonie gazu obojętnego (spawanie)	RSW	: Rezystancyjne zgrzewanie punktowe (spawanie)
HB	: Twardość Brinella (twardość)	SAW	: Spawanie łukiem krytym (spawanie)
HF	: Źródło prądu wysokiej częstotliwości (spawanie, lutowanie)	SMAW	: Spawanie łukiem osłoniętym elektrodą otuloną (spawanie)
HFIW	: Zgrzewanie indukcyjne prądem wysokiej częstotliwości (spawanie)	STT	: Przenoszenie siłami napięcia powierzchniowego (spawanie)
HR	: Produkt walcowany na gorąco (walcowanie)	SW	: Zgrzewanie liniowe (spawanie)
HRB	: Twardość Rockwella w skali B (twardość)	SWC	: Strefa wpływu ciepła (spawanie, cięcie termiczne)
HRC	: Twardość Rockwella w skali C (twardość)	TIG	: Spawanie elektrodą wolframową w osłonie gazu obojętnego (spawanie)
HSS	: Stal szybko tnąca (obróbka skrawaniem)	UW	: Zgrzewanie doczołowe (spawanie)
HV	: Twardość Vickersa (twardość)	WIG	: Spawanie elektrodą wolframową w osłonie gazu obojętnego (spawanie)
		YAG	: Itr-aluminium-granat (spawanie laserowe, cięcie termiczne)

6.4 Spis zdjęć i informacje o ich autorach

Okładka : Reaktor biochemiczny		8 : Kształtownik wyciskany na gorąco	s. 62
Producent : Pierre Guérin Technologies, Mauze (F) – zdjęcie : idem		producent : Cefival, Persan (F) – zdjęcie : idem	
1 : Linia do wyżarzania jasnego	s. 5	9 : Ręczne spawanie metodą GTAW	s. 64
producent : Drever International, Liège (B) – zdjęcie : idem		zdjęcie : © 2006 ESAB, Gothenburg (S)	
2 : Atomium, Bruksela (B)	s. 6	10 : Elementy złączne	s. 102
właściciel : stowarzyszenie Atomium – archi- tekt : C. Conix		zdjęcie : Benoît Van Hecke	
– wykonawca : tymczasowe stowarzyszenia Bgroup – Geocal – zdjęcie : Thomas Pauly – © 2006 stowarzyszenie Atomium – SABAM, Belgia 2006		11 : Instalacja pasteryzacji mleka	s. 105
3 : Linia wzdłużnego cięcia blach s.	24	producent : Pierre Guérin Technologies, Mauze (F) – zdjęcie : idem	
producent : Fagor Arrasate, Mondragon (E) – zdjęcie : idem		12 : Wykańczanie powierzchni	s. 109
4 : Hydrauliczne nożyce gilotynowe	s. 29	producent : Otto Suhner, Brugg (CH) – zdjęcie : idem	
producent : LVD Company nv, Gullegem (B) – zdjęcie : idem		13 : Pomiar wytrzymałości	s. 115
5 : Pokrywana płytką skrawająca z węglików spiekanych	s. 41	producent : Zwick, Ulm (D) – zdjęcie : idem	
producent : Seco Tools AB, Fagersta (S) – zdjęcie : idem		14 : Szybkowar	s. 118
6 : Pokrywana płytką skrawająca z cermetali	s. 41	producent : SEB, Selongey (F) – zdjęcie : idem	
zdjęcie : UGITECH, UGINE (F)		15 : Profesjonalny nóż kuchenny	s. 125
7 : Konstrukcja ze stali i szkła		producent : Wüsthof, Solingen (D) – zdjęcie : idem	
La lentille de la cour de Rome	s. 61	16 : Obudowa pompy	s. 126
właściciel : Régie autonome des transports parisiens (RATP) – architekt : Arté		producent : Ebara Pumps Europe, Cles (I) – zdjęcie : idem	
– Charpentier et associés – wykonawca : RFR Ingénieurs (Inżynier projektu : Mitsu Edwards) – zdjęcie : Mitsu Edwards – © RATP		17 : Grodzie ze stali nierdzewnej stosowane w chemikaliowcach	s. 126
		producent – shipyard : Cantieri Navali De Poli, Pellestrina (I) – zdjęcie : idem	
		18 : Element palnika	s. 127
		producent : Bekaert Combustion Technology, Assen (NL) – zdjęcie : idem	

6.5 Literatura

- 1 COLOMBIER L., HOCHMANN J., „Aciers inoxydables et Aciers réfractaires “. Dunod, Paryż, 1965. Tłumaczenie angielskie przez Scripta Technika Ltd., Stainless and Heat Resistant Steels, Wydawnictwo: Edward Arnold Publishers Ltd., Londyn, 1967
- 2 „La construction chaudronnée en acier inoxydable“, Ugine Kuhlmann – aciers spéciaux, Paryż, 1969.
- 3 „La pièce mécanique en acier inoxydable“, Ugine Aciers, Paryż, 1973.
- 4 „Le aciers inoxydables“(ouvrage collectif), éditeurs scientifiques: LACOMBE P., BAROUX B., BÉRANGER G., les Editions de Physique, Les Ulis, 1998. Tłumaczenie angielskie DAVIDSON J.H. i LINDQUIST J.B., Stainless Steels, Wydawnictwo les Editions de Physique, les Ulis, 1993.
- 5 CUNAT P.J., “Aciers inoxydables. Critères de choix et structure (M 4 540) ; Propriétés. Résistance à la corrosion (M 4 541) ; Mise en œuvre (M 4 542) ; Fabrication (M 4 543) “, Techniques de l’ingénieur, traité Matériaux métalliques, Paryż, 2000. Tłumaczenie angielskie DAVIDSON J.H., The Euro Inox Handbook of Stainless Steel, Euro Inox, Luxemburg, 2002.
- 6 „Design Manual for Stainless Steel“, Third Edition, Luxemburg, 2006
- 7 “Guide du collage de l’acier inoxydables/ Guide to adhesion bonding of stainless steel”, Dokument Ugine, La Défense, 1996.
- 8 Association Ouvrière des Compagnons du Devoir du Tour de France et la collaboration de G. Murry, koordynator, Travailler l’acier – Manuel de l’Artisan et du Technicien, Wydawnictwo SIRPE, Paryż, 1996.
- 9 MOIRON J.L., avec le concours de BENNEFOIS B. e CUNAT P.J., “Souder les aciers inoxydables”, SIRPE, Paryż, 2000.

ISBN 978-2-87997-185-8