Rodzaje korozji stali i metali – przyczyny, mechanizmy i przykłady

Korozja metali nie jest jednym, ściśle określonym zjawiskiem. W zależności od rodzaju materiału, środowiska, temperatury, obecności chlorków, naprężeń, przepływu medium czy kontaktu z innym metalem może przyjmować bardzo różne formy. W niektórych przypadkach ubytek materiału następuje równomiernie na całej powierzchni, w innych niemal niewidoczny punktowy wżer może doprowadzić do perforacji elementu.
Szczególne znaczenie ma to w przypadku stali nierdzewnych i stopów niklu. Określenie „stal nierdzewna” nie oznacza bowiem materiału całkowicie odpornego na korozję. Odporność stali nierdzewnych wynika przede wszystkim z obecności cienkiej, bogatej w chrom warstwy pasywnej tworzącej się na powierzchni metalu. Jeżeli warstwa ta zostanie lokalnie uszkodzona albo warunki środowiska uniemożliwią jej odbudowę, może rozpocząć się intensywny proces korozji. Dlatego dobór odpowiedniego gatunku – np. 1.4301 (AISI 304), 1.4404 (AISI 316L), 1.4539 (904L), 1.4529 (UNS N08926), 1.4547 (254 SMO), duplex 1.4462 (2205), superduplex 1.4410 (2507) czy stopów niklu takich jak Alloy 625 – powinien zawsze uwzględniać nie tylko ogólną „odporność na korozję”, lecz również konkretny mechanizm korozji występujący w danym środowisku.

Jak klasyfikuje się korozję metali?

Korozję można klasyfikować na kilka sposobów. Można mówić o korozji chemicznej i elektrochemicznej, o korozji równomiernej i miejscowej albo klasyfikować ją według mechanizmu jej powstawania.
Nie należy przy tym mieszać rodzaju korozji ze środowiskiem, w którym ona występuje. Określenia takie jak korozja atmosferyczna, morska, glebowa czy korozja w wodzie opisują przede wszystkim środowisko pracy materiału. W takich warunkach mogą natomiast występować różne mechanizmy: korozja równomierna, wżerowa, szczelinowa, galwaniczna, naprężeniowa i inne.
Do najważniejszych form korozji stali i innych metali należą:

Rodzaj korozji	Charakterystyka	Przykładowe materiały i gatunki

Korozja równomierna	Stopniowy ubytek materiału na dużej powierzchni	stale węglowe, 1.4301, 1.4404, 1.4539 – zależnie od środowiska
Korozja wżerowa	Lokalne, często głębokie wżery, szczególnie w obecności chlorków	1.4404, 1.4539, 1.4529, 1.4547, 1.4462, 1.4410
Korozja szczelinowa	Rozwija się w wąskich szczelinach i pod osadami	316L, 904L, 1.4529, 254 SMO, duplex i superduplex
Korozja międzykrystaliczna	Atak przebiegający wzdłuż granic ziaren	304L, 316L, 1.4541 (321), 1.4550 (347)
Korozja naprężeniowa SCC	Pękanie pod wpływem środowiska korozyjnego i naprężeń rozciągających	1.4462, 1.4410, 1.4529, 1.4547, stopy niklu
Korozja galwaniczna	Powstaje przy kontakcie dwóch różnych metali w obecności elektrolitu	np. stal nierdzewna połączona ze stalą węglową lub aluminium
Korozja erozyjna	Jednoczesne działanie korozji i szybko przepływającego medium	duplex 1.4462, superduplex 1.4410, wysokostopowe stale i stopy niklu
Korozja kawitacyjna	Uszkodzenie powierzchni wskutek implozji pęcherzyków w cieczy	elementy pomp, zaworów, wirników i instalacji hydraulicznych
Korozja zmęczeniowa	Połączenie cyklicznych naprężeń i środowiska korozyjnego	stale konstrukcyjne, nierdzewne, duplex i stopy niklu
Korozja cierna	Powstaje przy niewielkich ruchach współpracujących powierzchni	połączenia śrubowe, wały, łożyska, elementy maszyn
Korozja mikrobiologiczna MIC	Korozja inicjowana lub przyspieszana przez mikroorganizmy i biofilm	stale węglowe i nierdzewne, instalacje wodne i przemysłowe

Korozja wysokotemperaturowa	Utlenianie, nawęglanie, siarkowanie i inne reakcje w wysokiej temperaturze	1.4828, 1.4841, 1.4845, 1.4835 i stopy niklu

Korozja równomierna – ogólny ubytek powierzchni

Korozja równomierna, nazywana również korozją ogólną, obejmuje znaczną część powierzchni metalu. Materiał stopniowo zmniejsza swoją grubość, a szybkość procesu można często określić jako ubytek grubości w mm/rok.
Jest to typowe zjawisko dla niezabezpieczonych stali węglowych eksploatowanych w wilgotnej atmosferze, wodzie lub wielu środowiskach przemysłowych. Może jednak również występować w stalach nierdzewnych, jeżeli środowisko jest zbyt agresywne, aby materiał był zdolny do utrzymania warstwy pasywnej.
Przykładowo stal 1.4301 może być całkowicie wystarczająca w wielu łagodnych środowiskach, podczas gdy w bardziej agresywnych mediach konieczne może być zastosowanie stali molibdenowej 1.4404, wysokostopowej 1.4539 lub jeszcze bardziej odpornego materiału.

Korozja wżerowa – niewielki punkt, poważne uszkodzenie

Korozja wżerowa jest jedną z najważniejszych form korozji miejscowej stali nierdzewnych. Szczególne zagrożenie stanowią środowiska zawierające jony chlorkowe. Dochodzi wtedy do lokalnego uszkodzenia warstwy pasywnej i powstawania niewielkich zagłębień, które mogą rozwijać się głęboko w materiale. Właśnie dlatego korozja wżerowa jest szczególnie niebezpieczna – powierzchnia elementu może wyglądać stosunkowo dobrze, podczas gdy pojedynczy wżer może doprowadzić do perforacji ścianki.
Odporność stali nierdzewnych na ten rodzaj korozji zwiększają przede wszystkim chrom, molibden i azot. Do orientacyjnego porównania odporności różnych gatunków stosowany jest wskaźnik PREN.
Typowa stal 1.4301 (304) ma znacznie mniejszą odporność na korozję wżerową w środowiskach chlorkowych niż 1.4404 (316L). Jeszcze większą odporność zapewniają między innymi 1.4539 (904L), 1.4529 (UNS N08926), 1.4547 (254 SMO),

duplex 1.4462 (2205) oraz superduplex 1.4410 (2507).

Korozja szczelinowa

Korozja szczelinowa rozwija się w miejscach, do których dostęp tlenu i swobodna wymiana medium są ograniczone. Mogą to być przestrzenie pod uszczelkami, podkładkami, kołnierzami, osadami, nagarem lub innymi zanieczyszczeniami znajdującymi się na powierzchni.
Wewnątrz szczeliny zmienia się skład chemiczny roztworu, obniża się pH i może wzrosnąć lokalne stężenie chlorków. Warunki stają się znacznie bardziej agresywne niż na odsłoniętej powierzchni tego samego elementu.
Podobnie jak w przypadku korozji wżerowej, stale zawierające większą ilość molibdenu i azotu wykazują zazwyczaj większą odporność. W wymagających środowiskach stosowane są między innymi 904L, 1.4529, 254 SMO oraz stale duplex i superduplex.

Korozja międzykrystaliczna

Korozja międzykrystaliczna przebiega wzdłuż granic ziaren materiału. Klasycznym problemem w austenitycznych stalach nierdzewnych jest wydzielanie węglików chromu w określonym zakresie temperatur. Obszary sąsiadujące z granicami ziaren mogą zostać lokalnie zubożone w chrom, co zmniejsza ich zdolność do pasywacji. Zjawisko może mieć szczególne znaczenie w strefach wpływu ciepła po spawaniu.
Jednym ze sposobów ograniczenia ryzyka jest stosowanie niskowęglowych odmian stali, takich jak 1.4307 (304L) oraz 1.4404 (316L). Innym rozwiązaniem są stale stabilizowane, np. 1.4541 (AISI 321) stabilizowana tytanem oraz 1.4550 (AISI 347) stabilizowana niobem.

Korozja naprężeniowa SCC

Stress Corrosion Cracking, czyli korozja naprężeniowa, jest szczególnie niebezpiecznym mechanizmem, ponieważ może doprowadzić do pękania elementu przy stosunkowo niewielkim ogólnym ubytku materiału.
Do wystąpienia SCC konieczne jest jednoczesne występowanie podatnego materiału, odpowiednio agresywnego środowiska oraz naprężeń rozciągających. Naprężenia mogą pochodzić zarówno z obciążenia konstrukcji, jak i pozostawać w materiale po spawaniu, gięciu czy obróbce.
Klasyczne stale austenityczne typu 304 i 316 mogą być podatne na chlorkową

korozję naprężeniową, szczególnie wraz ze wzrostem temperatury. Znacznie wyższą odpornością w wielu takich warunkach charakteryzują się stale duplex 1.4462, superduplex 1.4410, wysokostopowe stale austenityczne 1.4529 i 1.4547 oraz odpowiednio dobrane stopy niklu.

Korozja galwaniczna – kontakt różnych metali

Korozja galwaniczna może pojawić się, gdy dwa różne metale pozostają ze sobą w kontakcie elektrycznym, a jednocześnie znajduje się pomiędzy nimi elektrolit, np. woda morska, woda technologiczna lub wilgotny osad.
Powstaje wówczas ogniwo galwaniczne. Metal mniej szlachetny staje się anodą i jego korozja może zostać znacznie przyspieszona.
Problem może występować przykładowo przy bezpośrednim łączeniu stali nierdzewnej ze stalą węglową lub aluminium. Znaczenie ma nie tylko rodzaj materiałów, ale również stosunek powierzchni anody i katody. Szczególnie niekorzystna może być mała powierzchnia mniej szlachetnego metalu połączona z dużą powierzchnią materiału bardziej szlachetnego.

Korozja erozyjna

Korozja erozyjna występuje wówczas, gdy proces elektrochemiczny zostaje przyspieszony przez mechaniczne oddziaływanie przepływającego medium. Duża prędkość cieczy, obecność cząstek stałych, turbulencje oraz gwałtowne zmiany kierunku przepływu mogą niszczyć warstwę ochronną powierzchni.
Zjawisko spotyka się między innymi w rurociągach, wymiennikach ciepła, pompach, zaworach i instalacjach procesowych.
W środowiskach wymagających jednocześnie wysokiej odporności korozyjnej i dobrych właściwości mechanicznych stosowane są m.in. stale duplex 1.4462 i superduplex 1.4410. W szczególnie agresywnych mediach konieczne może być zastosowanie wysokostopowych stali austenitycznych lub stopów niklu.

Korozja kawitacyjna

Kawitacja występuje w cieczy w wyniku gwałtownych zmian ciśnienia. Powstające pęcherzyki pary ulegają implozji w pobliżu powierzchni metalu, powodując lokalne uderzenia i stopniowe niszczenie materiału.
Uszkodzenia kawitacyjne występują najczęściej na wirnikach pomp, śrubach okrętowych, zaworach, turbinach i innych elementach instalacji hydraulicznych.

Korozja może dodatkowo przyspieszać mechaniczne niszczenie powierzchni.

Korozja zmęczeniowa

Korozja zmęczeniowa jest wynikiem jednoczesnego oddziaływania środowiska korozyjnego i zmiennych, cyklicznych naprężeń. Środowisko może przyspieszać inicjację oraz rozwój pęknięć zmęczeniowych, przez co trwałość elementu jest niższa niż w obojętnym środowisku.
Zjawisko ma znaczenie w elementach maszyn, wałach, konstrukcjach morskich, instalacjach chemicznych oraz częściach poddawanych drganiom i okresowo zmieniającym się obciążeniom.

Korozja cierna – fretting corrosion

Korozja cierna pojawia się na powierzchniach pozostających w kontakcie, pomiędzy którymi występują bardzo niewielkie, powtarzalne ruchy. Dochodzi wtedy do mechanicznego niszczenia warstw ochronnych, a powstające produkty zużycia mogą dodatkowo przyspieszać degradację powierzchni.
Zjawisko obserwowane jest m.in. w połączeniach śrubowych, łożyskach, wałach, sprzęgłach oraz innych elementach maszyn narażonych na drgania.

Korozja mikrobiologiczna MIC

MIC – Microbiologically Influenced Corrosion – oznacza korozję inicjowaną lub przyspieszaną przez aktywność mikroorganizmów. Bakterie i inne mikroorganizmy tworzą biofilm i zmieniają lokalne warunki chemiczne przy powierzchni metalu.
MIC może występować zarówno na stali węglowej, jak i nierdzewnej. Problem spotyka się w instalacjach wodnych, wymiennikach ciepła, zbiornikach, instalacjach przemysłu spożywczego, papierniczego, chemicznego oraz w systemach wody morskiej.
W tym przypadku sam wybór coraz wyżej stopowego gatunku nie zawsze rozwiązuje problem. Bardzo istotne są również konstrukcja instalacji, eliminowanie martwych stref, odpowiednie prędkości przepływu, czyszczenie oraz kontrola mikrobiologiczna medium.

Korozja wysokotemperaturowa

Korozja może zachodzić również bez udziału ciekłego elektrolitu. W wysokich temperaturach metal może reagować bezpośrednio z gazami znajdującymi się w otoczeniu.
Najbardziej znanym przykładem jest utlenianie wysokotemperaturowe, ale w zależności od atmosfery mogą występować również procesy siarkowania, nawęglania, azotowania czy oddziaływania gazów spalinowych.
W takich warunkach stosuje się specjalne stale żaroodporne i żarowytrzymałe. Przykładami są 1.4828, 1.4845 (AISI 310S), 1.4841 oraz 1.4835 (253 MA). W jeszcze bardziej wymagających warunkach temperaturowych i chemicznych stosowane są odpowiednio dobrane stopy niklu.

Środowisko ma równie duże znaczenie jak gatunek stali

Nie istnieje jeden gatunek stali, który byłby najlepszy we wszystkich środowiskach. Materiał odporny na jeden mechanizm korozji może zachowywać się znacznie gorzej w innym medium.
Przy doborze materiału należy uwzględnić między innymi:

- skład chemiczny medium,
- stężenie chlorków i innych agresywnych jonów,
- pH,
- temperaturę,
- ciśnienie,
- obecność tlenu,
- prędkość przepływu medium,
- możliwość powstawania osadów i szczelin,
- naprężenia mechaniczne i spawalnicze,
- kontakt z innymi metalami,
- stan i jakość powierzchni,
- warunki spawania i późniejszej obróbki.

Przykładowe gatunki stali a odporność na korozję

Wraz ze wzrostem zawartości odpowiednich pierwiastków stopowych możliwe jest

uzyskanie stali przeznaczonych do coraz bardziej agresywnych środowisk. Nie oznacza to jednak, że można stworzyć prostą uniwersalną skalę, w której jeden gatunek jest zawsze lepszy od drugiego.

Gatunek	Oznaczenie	Charakterystyka odporności korozyjnej
1.4301	AISI 304	Podstawowa stal austenityczna do wielu umiarkowanych środowisk; ograniczona odporność na korozję miejscową w chlorkach
1.4404	AISI 316L	Dodatek molibdenu zwiększa odporność na korozję miejscową w porównaniu z 304
1.4539	904L	Wysokostopowa stal austenityczna o podwyższonej odporności w wielu agresywnych środowiskach
1.4529	UNS N08926	Superaustenityczna stal Cr-Ni-Mo-N o wysokiej odporności na korozję miejscową
1.4547	254 SMO / UNS S31254	Bardzo wysoka odporność na korozję wżerową i szczelinową, przeznaczona m.in. do agresywnych środowisk chlorkowych
1.4462	Duplex 2205	Połączenie wysokiej wytrzymałości z dobrą odpornością na korozję miejscową i SCC
1.4410	Superduplex 2507	Bardzo wysoka odporność na korozję wżerową, szczelinową i chlorkową SCC
2.4856	Alloy 625 / UNS N06625	Stop niklu stosowany w bardzo wymagających środowiskach chemicznych, morskich i wysokotemperaturowych

Dlaczego prawidłowe rozpoznanie rodzaju korozji jest tak ważne?

Samo stwierdzenie, że element „koroduje”, nie wystarcza do prawidłowego doboru materiału. Zupełnie inne działania będą potrzebne w przypadku równomiernego ubytku powierzchni, inne w przypadku głębokich wżerów, jeszcze inne przy korozji naprężeniowej albo galwanicznej.
Przykładowo zwiększenie grubości ścianki może być skutecznym sposobem kompensowania przewidywalnej korozji równomiernej, ale niewiele pomoże przy

korozji naprężeniowej. Z kolei zastosowanie stali o wyższym PREN może znacząco zwiększyć odporność na korozję wżerową w chlorkach, lecz nie oznacza automatycznie odporności na każde środowisko chemiczne.
Dlatego przed wyborem gatunku stali należy ustalić nie tylko skład medium i temperaturę pracy, ale również najbardziej prawdopodobny mechanizm uszkodzenia.
Najważniejsze formy korozji metali to korozja równomierna, wżerowa, szczelinowa, międzykrystaliczna, naprężeniowa, galwaniczna, erozyjna, kawitacyjna, zmęczeniowa, cierna, mikrobiologiczna oraz wysokotemperaturowa.
W praktyce przemysłowej szczególne znaczenie dla stali nierdzewnych mają korozja wżerowa, szczelinowa, międzykrystaliczna i naprężeniowa. Ich występowanie jest jednym z głównych powodów stosowania bardziej stopowych materiałów takich jak 316L, 904L, 1.4529, 254 SMO, duplex 2205, superduplex 2507 czy stopy niklu.
Nie można jednak dobierać materiału wyłącznie na podstawie nazwy gatunku lub pojedynczego parametru. Odporność korozyjna zawsze zależy od konkretnego połączenia materiału, środowiska, temperatury, konstrukcji elementu i warunków jego eksploatacji.

Korozja może przebiegać według różnych mechanizmów zależnych od materiału, środowiska i warunków eksploatacji. Poznaj pozostałe rodzaje korozji:

Rodzaje korozji stali i metali

Korozja równomierna stali i metali
Korozja wżerowa stali nierdzewnych
Korozja szczelinowa stali nierdzewnych
Korozja międzykrystaliczna stali nierdzewnej
Korozja naprężeniowa SCC
Korozja galwaniczna
Korozja erozyjna
Korozja kawitacyjna
Korozja zmęczeniowa
Korozja cierna
Korozja mikrobiologiczna MIC
Korozja wysokotemperaturowa

Podział korozji ze względu na środowisko

Korozja morska – korozja stali i metali w wodzie morskiej
Korozja atmosferyczna
Korozja gruntowa
Korozja w wodzie słodkiej i przemysłowej
Korozja w środowiskach chlorkowych
Korozja w środowiskach kwaśnych
Korozja w środowiskach alkalicznych
Korozja w gazach i spalinach
Korozja w ściekach i instalacjach kanalizacyjnych
Korozja w środowiskach chemicznych i petrochemicznych

Tematy powiązane

CPT – krytyczna temperatura korozji wżerowej stali nierdzewnych i stopów niklu
PREN – wskaźnik odporności na korozję wżerową stali nierdzewnej
CCT – krytyczna temperatura korozji szczelinowej stali nierdzewnych i stopów niklu