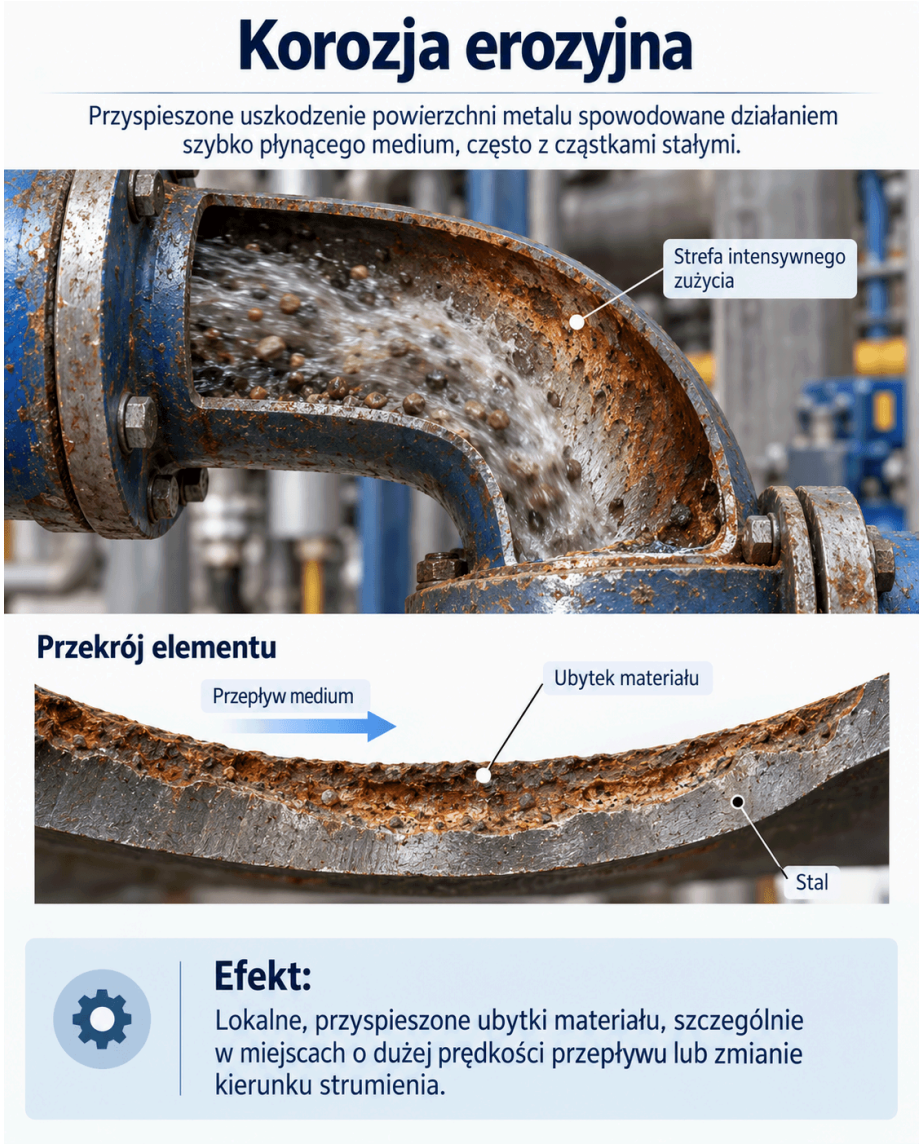
Korozja erozyjna – przyczyny, mechanizm i zapobieganie

Korozja erozyjna, określana również jako **erosion corrosion**, jest procesem niszczenia materiału wynikającym z jednoczesnego działania środowiska korozyjnego oraz mechanicznego oddziaływania przepływającego medium. Samo środowisko może powodować stosunkowo niewielką korozję, a sam przepływ nie musi prowadzić do intensywnego zużycia. Jeżeli jednak oba zjawiska występują jednocześnie, szybkość niszczenia materiału może znacząco wzrosnąć. Korozja erozyjna występuje przede wszystkim w rurociągach, pompach, zaworach, kolanach, wymiennikach ciepła, turbinach oraz innych urządzeniach, przez które przepływają ciecze lub mieszaniny cieczy i cząstek stałych.



Co to jest korozja erozyjna?

Korozja erozyjna jest efektem współdziałania dwóch procesów:

- **korozji elektrochemicznej lub chemicznej**,
- **mechanicznego usuwania materiału lub warstwy ochronnej przez przepływające medium**.

Przepływ cieczy może uszkadzać produkty korozji lub warstwę pasywną znajdującą się na powierzchni metalu.

Odsłonięty metal ponownie reaguje ze środowiskiem i może tworzyć nową warstwę ochronną.
Jeżeli jednak warstwa ta jest stale niszczona przez przepływ, powierzchnia materiału pozostaje aktywna i szybkość korozji może znacząco wzrosnąć.

Jak powstaje korozja erozyjna?

Mechanizm można w uproszczeniu przedstawić następująco:

1. na powierzchni metalu znajduje się warstwa pasywna lub warstwa produktów korozji,
2. przepływające medium mechanicznie uszkadza lub usuwa tę warstwę,
3. odsłonięty metal zaczyna intensywniej reagować ze środowiskiem,
4. na powierzchni ponownie tworzy się warstwa ochronna,
5. przepływ ponownie ją uszkadza,
6. cykl wielokrotnie się powtarza.

W efekcie ubytek materiału może następować znacznie szybciej niż wskutek samej korozji albo samego zużycia mechanicznego.

Korozja i erozja – efekt synergiczny

Korozja erozyjna nie zawsze jest prostą sumą korozji i zużycia mechanicznego.
Oba procesy mogą wzajemnie się wzmacniać.
Korozja może osłabiać powierzchnię materiału i ułatwiać jej mechaniczne usuwanie.
Z kolei erozja może niszczyć warstwę pasywną lub produkty korozji, odsłaniając świeżą powierzchnię metalu.
Dlatego rzeczywista szybkość niszczenia może być większa niż przewidywana na podstawie oddzielnej oceny korozji i erozji.

Najważniejsze czynniki wpływające na korozję erozyjną

Do najważniejszych czynników należą:

- prędkość przepływu medium,
- turbulencje,
- obecność cząstek stałych,

- wielkość i twardość cząstek,
- kąt uderzania cząstek w powierzchnię,
- temperatura,
- skład chemiczny medium,
- pH,
- zawartość chlorków i innych agresywnych jonów,
- obecność pęcherzyków gazu,
- geometria instalacji,
- odporność mechaniczna i korozyjna materiału.

Wpływ prędkości przepływu

Prędkość przepływu jest jednym z najważniejszych parametrów wpływających na ryzyko wystąpienia korozji erozyjnej.
Wzrost prędkości może zwiększać:

- siły ścinające działające na powierzchnię,
- intensywność turbulencji,
- energię uderzających cząstek,
- częstotliwość uderzeń cząstek w materiał,
- szybkość usuwania produktów korozji.

Nie istnieje jednak jedna uniwersalna graniczna prędkość przepływu obowiązująca dla wszystkich metali i wszystkich środowisk.
Dopuszczalna prędkość zależy od materiału, medium, temperatury, zawartości cząstek stałych oraz geometrii instalacji.

Dlaczego turbulencje zwiększają korozję erozyjną?

Przepływ turbulentny powoduje lokalne zmiany kierunku i prędkości cieczy.
W efekcie powierzchnia materiału może być narażona na znacznie większe obciążenia niż w przypadku spokojnego i równomiernego przepływu.
Dlatego intensywne uszkodzenia często występują w miejscach takich jak:

- kolana rurociągów,
- trójniki,
- redukcje średnicy,

- zawory,
- kryzy,
- wyloty przewodów,
- obszary bezpośrednio za pompami,
- miejsca gwałtownej zmiany kierunku przepływu.

Korozja erozyjna w kolanach rurociągów

Kolana należą do najbardziej typowych miejsc występowania korozji erozyjnej. Zmiana kierunku przepływu powoduje, że ciecz oraz znajdujące się w niej cząstki uderzają w określone obszary ścianki.
Jeżeli medium zawiera piasek, produkty korozji albo inne cząstki stałe, uszkodzenia mogą być szczególnie intensywne.
Z czasem może dochodzić do lokalnego zmniejszenia grubości ścianki, a ostatecznie do perforacji rurociągu.

Wpływ cząstek stałych

Obecność cząstek stałych może wielokrotnie zwiększać intensywność zużycia. Szczególnie niebezpieczne są:

- piasek,
- krzemionka,
- cząstki minerałów,
- produkty korozji,
- cząstki procesu technologicznego,
- osady transportowane wraz z cieczą.

Znaczenie mają nie tylko ich ilość, ale również:

- twardość,
- wielkość,
- kształt,
- prędkość,
- kąt uderzenia w powierzchnię.

Im bardziej ścierne są cząstki i im większa jest ich energia kinetyczna, tym większe może być uszkodzenie materiału.

Wpływ kąta uderzenia cząstek

Charakter uszkodzenia zależy również od kąta, pod którym cząstki uderzają w powierzchnię.
Przy małych kątach może dominować mechanizm przypominający skrawanie lub bruzdowanie powierzchni.
Przy większych kątach wzrasta udział uderzeń powodujących miejscowe odkształcenia i wykruszanie materiału.
Najbardziej niebezpieczny kąt zależy od właściwości materiału.
Materiały plastyczne i kruche mogą reagować na uderzenia w różny sposób.

Jak wygląda powierzchnia zaatakowana przez korozję erozyjną?

Uszkodzenia często mają charakter kierunkowy związany z przepływem medium.
Można obserwować:

- rowki,
- bruzdy,
- wygładzone powierzchnie,
- lokalne wgłębienia,
- charakterystyczne ślady kierunku przepływu,
- obszary silnego zwieńczenia ścianki.

Uszkodzenia są często skoncentrowane w miejscach zmiany kierunku albo gwałtownego przyspieszenia medium.

Korozja erozyjna stali nierdzewnych

Stale nierdzewne zawdzięczają wysoką odporność korozyjną cienkiej warstwie pasywnej znajdującej się na powierzchni.
Warstwa ta posiada zdolność do samoczynnego odtwarzania się po niewielkim uszkodzeniu.
Dlatego stale nierdzewne mogą wykazywać bardzo dobrą odporność na przepływające media, jeżeli szybkość repasywacji jest większa niż szybkość mechanicznego niszczenia powierzchni.
Problem pojawia się wtedy, gdy:

- prędkość przepływu jest bardzo duża,
- medium zawiera ścierne cząstki stałe,
- środowisko utrudnia repasywację,
- dochodzi do silnych turbulencji,
- występują jednocześnie inne formy korozji lokalnej.

304L i 316L a korozja erozyjna

Stale **1.4307 / 304L** i **1.4404 / 316L** mają dobrą odporność na wiele środowisk przepływowych.
316L dzięki obecności molibdenu ma większą odporność na korozję wżerową i szczelinową w środowiskach chlorkowych niż 304L.
Nie oznacza to jednak, że 316L jest odporna na każdą formę korozji erozyjnej.
W mediach zawierających duże ilości twardych cząstek stałych albo przy bardzo dużych prędkościach przepływu również stale typu 316L mogą ulegać intensywnemu zużyciu.

Duplex 2205 a korozja erozyjna

Stal **1.4462 / duplex 2205** może wykazywać bardzo dobrą odporność na korozję erozyjną.
Wynika to z połączenia:

- wysokiej odporności korozyjnej,
- większej wytrzymałości mechanicznej niż w typowych stalach austenitycznych,
- większej twardości,
- dobrej odporności na korozję lokalną.

Dlatego duplex 2205 może być korzystnym rozwiązaniem w instalacjach, w których klasyczne stale 304L lub 316L są narażone na intensywne działanie przepływu i cząstek ściernych.

Porównanie wybranych stali nierdzewnych

Gatunek	Typ stali	Odporność korozyjna	Odporność na erozję

1.4307 / 304L	austenityczna	dobra w łagodnych środowiskach	dobra przy umiarkowanych warunkach
1.4404 / 316L	austenityczna Mo	wyższa niż 304L w wielu środowiskach chlorkowych	dobra, ale ograniczona przy silnym działaniu cząstek
1.4462 / duplex 2205	duplex	wysoka	bardzo dobra
1.4410 / superduplex 2507	superduplex	bardzo wysoka	bardzo dobra

Korozja erozyjna a korozja wżerowa

Korozja erozyjna i wżerowa są różnymi mechanizmami.

Cecha	Korozja erozyjna	Korozja wżerowa
Główny czynnik	przepływ i mechaniczne oddziaływanie medium	lokalne uszkodzenie warstwy pasywnej
Znaczenie prędkości przepływu	bardzo duże	zależne od warunków
Cząstki stałe	mogą bardzo silnie zwiększać zużycie	nie są warunkiem koniecznym
Typowy wygląd	bruzdy, wygładzenia i kierunkowe ubytki	lokalne głębokie wżery

Korozja erozyjna a ścieranie

Zwykłe ścieranie jest przede wszystkim procesem mechanicznym.
Korozja erozyjna wymaga dodatkowego udziału środowiska korozyjnego.
Jeżeli piasek przepływa wraz z chemicznie obojętnym medium i mechanicznie

usuwa materiał, mamy przede wszystkim do czynienia z erozją lub zużyciem ściernym.
Jeżeli jednocześnie środowisko reaguje z metalem, a proces korozji i erozji wzajemnie się wzmacniają, mówimy o **korozji erozyjnej**.

Korozja erozyjna a kawitacja

Korozja erozyjna nie jest tym samym zjawiskiem co **erozja kawitacyjna**, chociaż oba mechanizmy mogą występować jednocześnie.
Kawitacja powstaje, gdy lokalny spadek ciśnienia powoduje tworzenie się pęcherzyków pary w cieczy.
Gdy pęcherzyki przemieszczają się do obszaru o wyższym ciśnieniu, gwałtownie zapadają się.
Ich implozja powoduje lokalne impulsy ciśnienia i mikrouderzenia działające na powierzchnię materiału.
Powtarzające się oddziaływanie może prowadzić do:

- deformacji powierzchni,
- powstawania mikropęknięć,
- wykruszania materiału,
- powstawania charakterystycznych kraterów.

Jeżeli jednocześnie występuje środowisko korozyjne, proces może zostać dodatkowo przyspieszony.

Gdzie występuje kawitacja?

Kawitacja występuje szczególnie często w:

- pompach,
- wirnikach,
- turbinach wodnych,
- śrubach okrętowych,
- zaworach,
- przewężeniach przepływu,
- elementach instalacji, w których występują gwałtowne zmiany ciśnienia.

Korozja erozyjna a kawitacja – różnice

Cecha	Korozja erozyjna	Erozja kawitacyjna
Główna przyczyna mechaniczna	przepływ medium i uderzenia cząstek	zapadanie się pęcherzyków pary
Cząstki stałe	często zwiększają uszkodzenia	nie są konieczne
Typowe miejsca	kolana, zawory, trójniki, rurociągi	pompy, wirniki, turbiny, śruby okrętowe

Korozja erozyjna a FAC

Z korozją erozyjną nie należy automatycznie utożsamiać zjawiska **FAC – Flow Accelerated Corrosion**, czyli korozji przyspieszonej przepływem.
FAC występuje szczególnie w instalacjach ze stali węglowej transportujących wodę lub parę wodną.
Przepływ powoduje rozpuszczanie i usuwanie ochronnej warstwy tlenków z powierzchni materiału, prowadząc do stopniowego ścieńczania ścianki.
W FAC nie jest konieczne występowanie ściernych cząstek ani typowego mechanicznego skrawania powierzchni.
Rozróżnienie tych zjawisk jest ważne przy analizowaniu przyczyn awarii rurociągów.

Gdzie najczęściej występuje korozja erozyjna?

Typowe elementy narażone na korozję erozyjną to:

- rurociągi,
- kolana,
- trójniki,
- zawory,
- pompy,
- wirniki,
- wymienniki ciepła,
- rurociągi wody morskiej,
- instalacje górnicze,
- instalacje transportujące zawiesiny,

- instalacje przemysłu chemicznego,
- instalacje naftowe i gazowe,
- urządzenia oczyszczania ścieków.

Korozja erozyjna w wymiennikach ciepła

W wymiennikach ciepła ryzyko może wzrastać w miejscach, w których medium wpływa do rur z dużą prędkością.
Szczególnie narażone mogą być:

- wloty rur,
- strefy zmiany kierunku przepływu,
- obszary turbulencji,
- miejsca gromadzenia lub przemieszczania się cząstek stałych.

Uszkodzenie rury może doprowadzić do zmieszania mediów znajdujących się po dwóch stronach wymiennika.

Korozja erozyjna w pompach

Pompy są szczególnie narażone ze względu na:

- wysokie lokalne prędkości przepływu,
- gwałtowne zmiany ciśnienia,
- turbulencje,
- możliwość występowania kawitacji,
- obecność cząstek stałych.

Uszkodzenia mogą występować na wirnikach, obudowach i innych elementach mających bezpośredni kontakt z medium.

Jak zapobiegać korozji erozyjnej?

Najważniejsze sposoby ograniczania korozji erozyjnej to:

- zmniejszenie nadmiernej prędkości przepływu,
- ograniczenie turbulencji,
- łagodne projektowanie zmian kierunku przepływu,

- unikanie gwałtownych zmian średnicy przewodów,
- usuwanie cząstek stałych z medium,
- stosowanie filtrów i separatorów,
- dobór materiałów o wysokiej odporności korozyjnej i mechanicznej,
- eliminowanie warunków sprzyjających kawitacji,
- kontrola pH i składu chemicznego medium,
- kontrola temperatury,
- monitorowanie grubości ścianek instalacji.

Projektowanie rurociągów a korozja erozyjna

Prawidłowa geometria instalacji może znacząco ograniczyć ryzyko uszkodzeń. Należy w miarę możliwości:

- stosować łagodne kolana zamiast gwałtownych zmian kierunku,
- unikać nagłych przewężeń i rozszerzeń,
- ograniczać lokalne strefy turbulencji,
- unikać bezpośredniego uderzania strumienia w ściankę,
- kontrolować prędkość przepływu,
- uwzględniać obecność cząstek stałych już na etapie projektowania.

Jak wykrywać korozję erozyjną?

Do oceny stanu instalacji stosuje się między innymi:

- oględziny powierzchni,
- pomiary grubości metodą ultradźwiękową,
- mapowanie grubości ścianek,
- badania endoskopowe,
- kontrolę charakterystycznych miejsc instalacji,
- monitoring parametrów przepływu.

Szczególną uwagę należy zwracać na kolana, zawory, przewężenia oraz miejsca bezpośrednio za elementami powodującymi zaburzenie przepływu.

Korozja erozyjna – najważniejsze wnioski

Korozja erozyjna jest wynikiem jednoczesnego działania **środowiska korozyjnego**

i mechanicznego oddziaływania przepływającego medium.
Szczególne znaczenie mają prędkość przepływu, turbulencje oraz obecność twardych cząstek stałych.
Największe uszkodzenia często występują w kolanach, zaworach, przewężeniach, pompach i innych miejscach powodujących gwałtowną zmianę kierunku lub prędkości przepływu.
Stale nierdzewne dzięki zdolności do repasywacji mogą wykazywać bardzo dobrą odporność na przepływające media, jednak przy bardzo dużych prędkościach albo w obecności silnie ściernych cząstek również mogą ulegać korozji erozyjnej.
Stale duplex, takie jak **1.4462 / 2205**, dzięki połączeniu wysokiej odporności korozyjnej, wytrzymałości i twardości mogą wykazywać znacznie większą odporność na korozję erozyjną niż standardowe austenityczne stale nierdzewne 304L i 316L.
Ograniczenie ryzyka wymaga jednoczesnego uwzględnienia **materiału, składu medium, prędkości przepływu, zawartości cząstek stałych oraz geometrii instalacji**.

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