



Korozja mikrobiologiczna MIC – przyczyny, mechanizm i zapobieganie

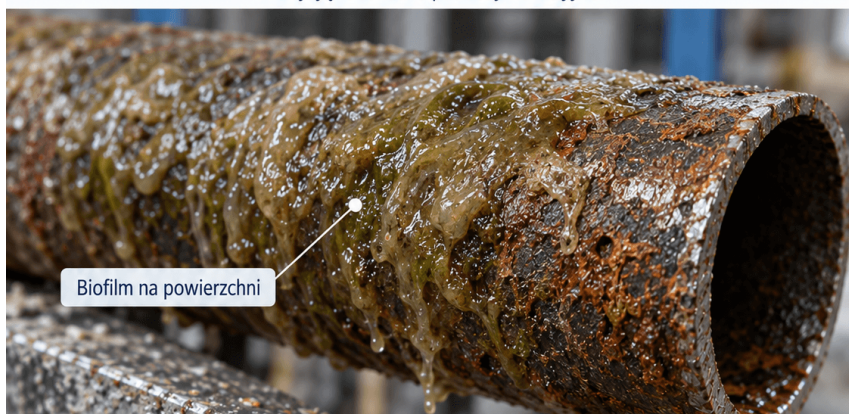
Korozja mikrobiologiczna MIC – z angielskiego **Microbiologically Influenced Corrosion** – jest korozją, której inicjacja, przebieg lub szybkość są związane z aktywnością mikroorganizmów występujących na powierzchni materiału lub w otaczającym go środowisku.

Mikroorganizmy nie tworzą jednego, charakterystycznego wyłącznie dla nich mechanizmu korozji. Mogą natomiast zmieniać lokalne warunki elektrochemiczne, tworzyć biofilm, wytwarzać agresywne produkty przemiany materii oraz sprzyjać powstawaniu korozji wżerowej, szczelinowej i podosadowej.

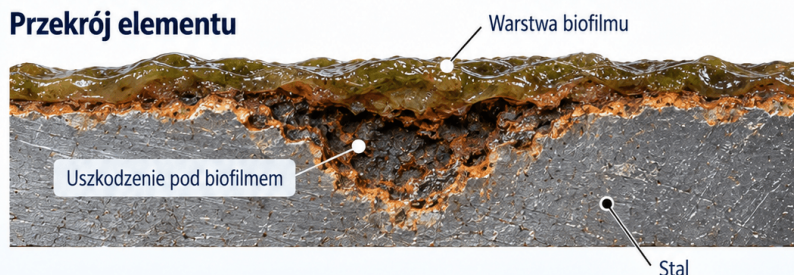


Korozja mikrobiologiczna MIC

Korozja wywołana przez mikroorganizmy tworzące biofilm na powierzchni metalu i inicjujące lokalne procesy korozyjne.



Przekrój elementu



Efekt:

Lokalne, często głębokie uszkodzenia prowadzące do osłabienia konstrukcji i zwiększonego ryzyka nieszczelności.

MIC może dotyczyć zarówno **stali węglowych, jak i stali nierdzewnych**, a także innych metali i stopów.

Zjawisko występuje między innymi w instalacjach wodnych, chłodniczych, przemysłowych, energetycznych, petrochemicznych, morskich, kanalizacyjnych oraz w zbiornikach i rurociągach.

Co to jest MIC?

MIC nie oznacza, że mikroorganizmy bezpośrednio „zjadają” metal.

Ich aktywność może powodować zmianę warunków na powierzchni materiału i przyspieszać reakcje elektrochemiczne.

Mikroorganizmy mogą między innymi:



- tworzyć biofilm,
- zużywać tlen,
- zmieniać lokalne pH,
- wytwarzać siarczki i kwasy,
- zmieniać potencjał elektrochemiczny powierzchni,
- tworzyć osady zatrzymujące agresywne związki,
- powodować powstawanie różnic stężenia tlenu,
- sprzyjać inicjacji korozji wżerowej i szczelinowej.

Dlatego określenie **korozja mikrobiologicznie indukowana** jest pewnym uproszczeniem. Bardziej precyzyjne znaczenie terminu MIC to korozja **pod wpływem aktywności mikroorganizmów**.

Biofilm – podstawowy element MIC

Jednym z najważniejszych elementów rozwoju MIC jest **biofilm**.

Biofilm jest warstwą mikroorganizmów oraz wytwarzanych przez nie substancji przylegającą do powierzchni materiału.

Może zawierać:

- bakterie,
- archeony,
- grzyby,
- mikroalgi,
- produkty przemiany materii,
- substancje polimerowe wydzielane przez mikroorganizmy,
- cząstki mineralne i osady.

Biofilm nie jest jednorodną warstwą.

W jego wnętrzu mogą występować znaczne różnice:

- stężenia tlenu,
- pH,
- potencjału elektrochemicznego,
- stężenia jonów,
- rodzaju aktywnych mikroorganizmów.

Powstają w ten sposób lokalne mikrośrodowiska, których skład może znacząco różnić się od składu całej cieczy w instalacji.



Jak rozwija się korozja mikrobiologiczna?

Proces MIC można w uproszczeniu przedstawić następująco:

1. mikroorganizmy osadzają się na powierzchni materiału,
2. rozpoczyna się tworzenie biofilmu,
3. biofilm zatrzymuje osady i zmienia lokalne warunki chemiczne,
4. w różnych obszarach powierzchni powstają różnice stężenia tlenu, pH i potencjału,
5. mogą tworzyć się lokalne ogniwa elektrochemiczne,
6. mikroorganizmy wytwarzają produkty przemiany materii,
7. dochodzi do lokalnego uszkodzenia warstwy ochronnej lub pasywnej,
8. rozpoczyna się korozja lokalna,
9. pod biofilmem lub osadem mogą powstawać głębokie wżery.

Jakie mikroorganizmy mogą uczestniczyć w MIC?

W MIC może uczestniczyć wiele grup mikroorganizmów.

Najczęściej wymienia się:

- bakterie redukujące siarczany – SRB,
- bakterie utleniające siarkę,
- bakterie produkujące kwasy,
- bakterie utleniające żelazo,
- bakterie utleniające mangan,
- mikroorganizmy metanogenne,
- grzyby,
- mikroalgi.

W rzeczywistych instalacjach biofilm jest często tworzony przez wiele różnych gatunków jednocześnie.

Dlatego przypisanie awarii jednemu konkretnemu mikroorganizmowi może być trudne.

Bakterie redukujące siarczany SRB

Jedną z najczęściej kojarzonych z MIC grup są **bakterie redukujące siarczany – SRB**.



Rozwijają się przede wszystkim w warunkach beztlenowych lub w lokalnych strefach biofilmu, w których zawartość tlenu jest bardzo mała.

Mogą redukować siarczany do siarczków.

W wyniku ich aktywności mogą powstawać:

- siarkowodór H_2S ,
- jony siarczkowe,
- siarczki żelaza FeS .

Produkty te mogą wpływać na reakcje elektrochemiczne zachodzące na powierzchni metalu i zwiększać ryzyko lokalnej korozji.

Współczesne wyjaśnienie MIC wywoływanej przez SRB jest bardziej złożone niż dawna teoria tzw. depolaryzacji katodowej. Istotne znaczenie mogą mieć między innymi biogeniczne siarczki, biofilm oraz bezpośrednia wymiana elektronów pomiędzy mikroorganizmami i metalem.

Bakterie utleniające żelazo

Bakterie utleniające żelazo mogą powodować powstawanie charakterystycznych osadów zawierających tlenki i wodorotlenki żelaza.

Osady te mogą tworzyć nad powierzchnią metalu lokalne środowisko sprzyjające korozji podosadowej.

Pod osadem może występować mniejsze stężenie tlenu niż na powierzchni otaczającej.

W efekcie może powstać ogniwo różnicowego napowietrzenia:

- obszar pod osadem staje się bardziej anodowy,
- otaczająca powierzchnia natleniona może pełnić rolę katody.

Może to prowadzić do intensywnej lokalnej korozji pod osadem.

Bakterie utleniające mangan

Mikroorganizmy utleniające mangan mogą tworzyć na powierzchni osady tlenków manganu.

Tlenki manganu są silnymi utleniaczami i mogą wpływać na potencjał elektrochemiczny stali nierdzewnej.

Zjawisko to może prowadzić do tzw. **ennoblement**, czyli przesunięcia potencjału



korozyjnego stali w kierunku bardziej dodatnich wartości.

Jeżeli potencjał powierzchni zbliży się do potencjału inicjacji korozji wżerowej, ryzyko lokalnego uszkodzenia warstwy pasywnej może wzrosnąć.

Bakterie produkujące kwasy

Niektóre mikroorganizmy mogą wytwarzać kwasy organiczne lub nieorganiczne. Lokalne obniżenie pH pod biofilmem może zwiększać agresywność środowiska i destabilizować warstwy ochronne.

Znaczenie mogą mieć między innymi:

- kwasy organiczne,
- kwas siarkowy powstający w wyniku przemian związków siarki,
- inne kwaśne produkty metabolizmu.

Nawet jeżeli pH całej cieczy pozostaje prawie obojętne, bezpośrednio pod biofilmem może występować zupełnie inne środowisko.

MIC a różnica stężenia tlenu

Biofilm utrudnia transport tlenu do powierzchni metalu.

W rezultacie pod biofilmem mogą powstawać obszary ubogie w tlen.

Powierzchnia znajdująca się poza biofilmem pozostaje natomiast lepiej natleniona.

Powstaje wtedy ogniwo koncentracyjne.

W uproszczeniu:

- obszar ubogi w tlen może stać się anodą,
- obszar bogaty w tlen może stać się katodą.

Niewielka powierzchnia anodowa otoczona dużą powierzchnią katodową może prowadzić do intensywnej lokalnej korozji.

MIC stali nierdzewnych

Stale nierdzewne posiadają ochronną warstwę pasywną, która zapewnia im wysoką odporność na wiele środowisk.

Biofilm może jednak lokalnie zmieniać warunki na powierzchni na tyle, że warstwa pasywna traci stabilność.



Szczególnie niebezpieczne są:

- stagnacja wody,
- osady,
- biofilm,
- chlorki,
- lokalne obniżenie pH,
- różnice stężenia tlenu,
- osady żelaza i manganu.

MIC stali nierdzewnych bardzo często objawia się jako **korozja wżerowa lub korozja pod osadem**.

304 i 304L a MIC

Stale **1.4301 / 304** i **1.4307 / 304L** mogą być podatne na MIC w instalacjach wodnych, szczególnie jeżeli występują:

- stagnacja,
- osady,
- biofilm,
- chlorki,
- podwyższona temperatura,
- nieprawidłowo wykonane lub oczyszczone spoiny.

Brak molibdenu oznacza również mniejszą odporność na korozję wżerową niż w przypadku 316L.

316 i 316L a MIC

Stale **1.4401 / 316** i **1.4404 / 316L** dzięki dodatkowi molibdenu mają większą odporność na korozję wżerową niż 304 i 304L.

Nie oznacza to jednak odporności na MIC.

Znane są przypadki korozji mikrobiologicznej stali 316 i 316L w instalacjach wodnych.

Jeżeli biofilm tworzy silnie agresywne lokalne środowisko, również warstwa pasywna 316L może zostać uszkodzona.



904L, 254 SMO i Alloy 926 a MIC

W bardziej agresywnych środowiskach stosuje się stale o znacznie większej odporności na korozję lokalną, takie jak:

- **1.4539 / 904L,**
- **1.4547 / 254 SMO,**
- **1.4529 / Alloy 926 / UNS N08926.**

Wyższa zawartość chromu, molibdenu i azotu zwiększa odporność tych materiałów na korozję wżerową i szczelinową.

Może to znacząco zwiększać odporność na lokalne uszkodzenia związane z MIC.

Nie należy jednak przyjmować, że jakiegokolwiek gatunek stali jest całkowicie odporny na MIC niezależnie od warunków.

Duplex 2205 i superduplex 2507 a MIC

Stale duplex:

- **1.4462 / duplex 2205,**
- **1.4410 / superduplex 2507**

wykazują znacznie większą odporność na korozję lokalną niż klasyczne stale austenityczne 304L i 316L.

Szczególnie superduplex 2507 posiada wysoką odporność na korozję wżerową i szczelinową w środowiskach chlorkowych.

Może to być istotną zaletą w instalacjach narażonych na MIC.

Jednocześnie nawet zastosowanie stali duplex lub superduplex nie powinno zastępować prawidłowej kontroli biofilmu, stagnacji i jakości wody.

Porównanie wybranych stali nierdzewnych

Gatunek	Typ stali	Odporność na korozję lokalną	Znaczenie przy MIC
---------	-----------	------------------------------	--------------------



1.4307 / 304L	austenityczna	umiarkowana	możliwa podatność na MIC i korozję podosadową
1.4404 / 316L	austenityczna Mo	wyższa niż 304L	MIC nadal możliwa w sprzyjających warunkach
1.4539 / 904L	wysokostopowa austenityczna	wysoka	większa odporność na lokalne uszkodzenie warstwy pasywnej
1.4529 / Alloy 926	wysokostopowa austenityczna	bardzo wysoka	bardzo dobra odporność na korozję lokalną
1.4547 / 254 SMO	stal 6Mo	bardzo wysoka	bardzo dobra odporność na korozję lokalną
1.4462 / duplex 2205	duplex	wysoka	większa odporność niż typowe 304L i 316L
1.4410 / superduplex 2507	superduplex	bardzo wysoka	wysoka odporność w agresywnych środowiskach chlorkowych

MIC a korozja wżerowa

MIC bardzo często prowadzi do powstawania uszkodzeń przypominających klasyczną korozję wżerową.

Nie oznacza to jednak, że każdy wżer znajdujący się pod biofilmem został wywołany przez mikroorganizmy.

Cecha	MIC	Klasyczna korozja wżerowa
-------	-----	---------------------------



Mikroorganizmy	wpływają na warunki korozji	nie są konieczne
Biofilm	często obecny	nie jest wymagany
Uszkodzenie	często lokalne wżery pod biofilmem lub osadem	lokalne wżery wynikające z utraty pasywności
Diagnostyka	wymaga również oceny mikrobiologicznej i chemicznej	głównie analiza materiału i środowiska

MIC a korozja pod osadem

Biofilm i produkty działalności mikroorganizmów mogą tworzyć lub zatrzymywać osady.

Pod osadem:

- pogarsza się dostęp tlenu,
- zmienia się pH,
- mogą gromadzić się chlorki,
- utrudniona jest wymiana cieczy,
- powstaje środowisko podobne do szczeliny.

Dlatego MIC jest często bardzo silnie związana z **korozją podosadową i szczelinową**.

Dlaczego stagnacja sprzyja MIC?

Woda pozostająca przez długi czas bez ruchu tworzy dobre warunki do kolonizacji powierzchni.

Stagnacja sprzyja:

- osadzaniu się cząstek,
- rozwojowi biofilmu,



- powstawaniu lokalnych stref ubogich w tlen,
- utrzymywaniu produktów przemiany materii przy powierzchni,
- powstawaniu lokalnych różnic chemicznych.

Dlatego tzw. martwe odnogi rurociągów są szczególnie niekorzystnym elementem konstrukcji.

Martwe odnogi i niewykorzystywane fragmenty instalacji

Dead legs, czyli odcinki instalacji o bardzo małym lub zerowym przepływie, należą do typowych miejsc rozwoju MIC.

Może w nich dochodzić do:

- stagnacji wody,
- gromadzenia osadów,
- rozwoju biofilmu,
- zmian zawartości tlenu,
- lokalnego wzrostu stężenia agresywnych związków.

Przy projektowaniu instalacji warto więc ograniczać liczbę takich miejsc.

MIC w instalacjach wodnych

Korozja mikrobiologiczna może występować zarówno w wodzie słodkiej, jak i morskiej.

Problem może dotyczyć:

- instalacji wody chłodzącej,
- instalacji przeciwpożarowych,
- wody technologicznej,
- instalacji wody pitnej,
- obiegu chłodniczego,
- instalacji hydrottestowych,
- rurociągów wody morskiej.

Szczególnie niebezpieczne są instalacje, które przez długi czas pozostają wypełnione wodą bez przepływu.



MIC po próbach hydrostatycznych

Próby hydrostatyczne mogą stworzyć warunki sprzyjające MIC, jeżeli po zakończeniu próby w instalacji pozostaje woda.

Ryzyko wzrasta, gdy:

- woda nie jest odpowiedniej jakości,
- zawiera mikroorganizmy i składniki odżywcze,
- instalacja nie zostanie dokładnie opróżniona,
- występują martwe odnogi,
- woda pozostaje przez długi czas w temperaturze sprzyjającej rozwojowi mikroorganizmów.

Po próbie hydrostatycznej instalację należy więc odpowiednio opróżnić, oczyścić i – jeśli wymaga tego procedura technologiczna – wysuszyć lub zabezpieczyć wodę przed rozwojem mikrobiologicznym.

MIC w instalacjach przeciwpożarowych

Instalacje przeciwpożarowe mogą być szczególnie podatne na MIC ze względu na długotrwałą stagnację wody.

Przez większość czasu przepływ jest w nich niewielki lub nie występuje wcale.

Może to sprzyjać:

- powstawaniu biofilmu,
- osadzaniu produktów korozji,
- korozji podosadowej,
- lokalnym perforacjom przewodów.

MIC w instalacjach ropy i gazu

MIC jest ważnym problemem również w przemyśle naftowym i gazowym.

Może występować w:

- rurociągach,
- zbiornikach,
- separatorach,
- instalacjach zatłaczania wody,



- systemach produkcyjnych,
- instalacjach offshore.

Szczególne znaczenie mają środowiska zawierające wodę, ponieważ mikroorganizmy potrzebują fazy wodnej do aktywności metabolicznej.

MIC w spoinach stali nierdzewnej

Okolice spoin mogą być szczególnie narażone, jeżeli po spawaniu pozostają:

- barwy nalotowe,
- tlenki spawalnicze,
- chropowata powierzchnia,
- zanieczyszczenia,
- szczeliny konstrukcyjne.

Takie miejsca mogą ułatwiać osadzanie biofilmu i lokalne uszkodzenie pasywności. Dlatego w odpowiedzialnych instalacjach ze stali nierdzewnej duże znaczenie ma prawidłowe:

- spawanie,
- trawienie,
- czyszczenie,
- pasywowanie powierzchni,
- usuwanie zanieczyszczeń żelaznych.

Jak wygląda MIC?

MIC nie ma jednego charakterystycznego wyglądu pozwalającego na pewną diagnozę wyłącznie na podstawie oględzin.

Można jednak obserwować:

- biofilm,
- śluzowate osady,
- brunatne lub czarne osady,
- lokalne guzki i tuberkulacje,
- korozję pod osadem,
- głębokie wżery,
- lokalne perforacje.



Sam kształt wżeru nie jest jednak wystarczającym dowodem na MIC.

Jak potwierdzić MIC?

Prawidłowa diagnostyka MIC powinna łączyć kilka niezależnych rodzajów informacji. Analizuje się:

- obecność i rodzaj mikroorganizmów,
- biofilm,
- produkty korozji,
- skład chemiczny osadów,
- morfologię wżerów,
- materiał konstrukcyjny,
- jakość powierzchni i spoin,
- parametry wody lub innego medium,
- temperaturę,
- warunki przepływu i okresy stagnacji.

Samo wykrycie bakterii w wodzie nie oznacza jeszcze, że to one spowodowały uszkodzenie.

Podobnie sam charakterystyczny wżer nie jest wystarczającym potwierdzeniem MIC.

Metody badań mikrobiologicznych

Do oceny aktywności mikroorganizmów mogą być stosowane między innymi:

- hodowle mikrobiologiczne,
- testy ATP,
- metody molekularne, w tym PCR i qPCR,
- mikroskopia,
- analiza biofilmu,
- badanie próbek osadów i produktów korozji.

Każda z metod dostarcza innych informacji, dlatego w poważnych przypadkach korzystne jest łączenie kilku technik.



Dlaczego próbka samej wody może nie wystarczyć?

Mikroorganizmy odpowiedzialne za MIC bardzo często rozwijają się przede wszystkim w biofilmie znajdującym się bezpośrednio na powierzchni materiału. Ich ilość w wodzie przepływającej przez instalację może być stosunkowo mała. Dlatego wynik analizy próbki wody nie zawsze odpowiada sytuacji panującej pod osadem lub biofilmem.

Przy diagnostyce warto pobierać również:

- biofilm,
- osady,
- produkty korozji,
- próbki bezpośrednio z uszkodzonej powierzchni.

Jak zapobiegać MIC?

Ochrona przed MIC powinna przede wszystkim utrudniać powstawanie i rozwój biofilmu.

Najważniejsze działania obejmują:

- ograniczanie stagnacji,
- eliminowanie martwych odnóg,
- utrzymywanie odpowiedniej prędkości przepływu,
- regularne usuwanie osadów,
- mechaniczne czyszczenie instalacji,
- kontrolę jakości wody,
- kontrolę zawartości składników odżywczych dla mikroorganizmów,
- stosowanie odpowiednio dobranych biocydów,
- prawidłowe opróżnianie instalacji po próbach wodnych,
- dobór odpowiedniego materiału,
- prawidłowe wykonanie spoin,
- utrzymywanie czystej i prawidłowo pasywowanej powierzchni stali nierdzewnej.

Biocydy a MIC

Biocydy mogą być stosowane do ograniczania rozwoju mikroorganizmów w



instalacji.

Ich skuteczność zależy jednak od:

- rodzaju mikroorganizmów,
- rodzaju biofilmu,
- stężenia biocydu,
- czasu kontaktu,
- temperatury,
- pH,
- obecności osadów,
- przepływu medium.

Dojrzały biofilm może utrudniać dotarcie środka chemicznego do mikroorganizmów znajdujących się najbliższej powierzchni.

Dlatego samo dawkowanie biocydu bez usuwania osadów i kontroli warunków pracy instalacji może być niewystarczające.

Czyszczenie mechaniczne

Usuwanie biofilmu i osadów jest jednym z najważniejszych sposobów ograniczenia MIC.

W zależności od instalacji stosuje się:

- płukanie,
- czyszczenie mechaniczne,
- pigging rurociągów,
- czyszczenie hydrodynamiczne,
- odpowiednio dobrane czyszczenie chemiczne.

Usunięcie osadu ułatwia również działanie środków biobójczych.

Dobór materiału a MIC

Zastosowanie materiału o większej odporności na korozję lokalną może znacząco zmniejszyć ryzyko perforacji.

Nie powinno jednak być jedynym środkiem ochronnym.

Nawet wysokostopowe stale mogą pracować w bardzo niekorzystnych warunkach, jeżeli instalacja:



- jest stale zanieczyszczona,
- zawiera duże ilości biofilmu,
- posiada liczne martwe odnogi,
- pracuje okresowo i długo pozostaje w stagnacji,
- nie jest odpowiednio czyszczona.

Najlepsze efekty daje połączenie prawidłowego doboru materiału z kontrolą warunków eksploatacji.

MIC a PREN

Wskaźnik **PREN** określa przede wszystkim względną odporność stali nierdzewnych na korozję wżerową.

Wyższy PREN zwykle oznacza większą odporność na lokalne przebicie warstwy pasywnej w środowiskach chlorkowych.

Może mieć więc znaczenie również przy MIC, ponieważ korozja mikrobiologiczna często prowadzi do lokalnego uszkodzenia pasywności.

PREN nie jest jednak wskaźnikiem bezpośrednio określającym odporność na MIC. Nie uwzględnia:

- rodzaju mikroorganizmów,
- biofilmu,
- stagnacji,
- składu wody,
- osadów,
- warunków eksploatacji.

Nie należy więc na podstawie samej wartości PREN stwierdzać, że dany materiał jest odporny na MIC.

Najczęstsze błędy sprzyjające MIC

Do typowych problemów należą:

- pozostawienie stojącej wody po próbie hydrostatycznej,
- martwe odnogi rurociągów,
- długotrwała stagnacja,
- brak możliwości pełnego opróżnienia instalacji,



- nagromadzenie osadów,
- brak regularnego czyszczenia,
- nieodpowiednia kontrola mikrobiologiczna wody,
- nieoczyszczone spoiny stali nierdzewnej,
- pozostawienie zgorzeliny i przebarwień spawalniczych,
- dobór materiału o zbyt małej odporności na korozję lokalną.

Korozja mikrobiologiczna MIC – najważniejsze wnioski

Korozja mikrobiologiczna MIC jest procesem, w którym **aktywność mikroorganizmów wpływa na inicjację, mechanizm lub szybkość korozji**. Kluczową rolę odgrywa najczęściej biofilm, który powoduje powstawanie lokalnego mikrośrodowiska znacznie różniącego się od warunków panujących w całej instalacji.

Mikroorganizmy mogą zmieniać pH, stężenie tlenu i potencjał elektrochemiczny oraz wytwarzać siarczki, kwasy i inne związki wpływające na korozję.

MIC często prowadzi do **korozji wżerowej, szczelinowej lub podosadowej** i może dotyczyć również stali nierdzewnych 304L i 316L.

Materiały o większej odporności na korozję lokalną, takie jak **904L, duplex 2205, superduplex 2507, 254 SMO i Alloy 926**, mogą znacznie ograniczać ryzyko lokalnego uszkodzenia, jednak nie eliminują konieczności kontroli biofilmu i warunków pracy instalacji.

Szczególne znaczenie mają **stagnacja, martwe odnogi, osady, jakość wody, stan spoin oraz możliwość dokładnego czyszczenia i opróżnienia instalacji**.

Rozpoznanie MIC nie powinno opierać się wyłącznie na wyglądzie wżeru albo wykryciu mikroorganizmów w wodzie. Wiarygodna diagnoza wymaga połączenia badań mikrobiologicznych, chemicznych, materiałowych i analizy warunków eksploatacji.

Rodzaje korozji stali i metali

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

[Korozja równomierna stali i metali](#)

[Korozja wżerowa stali nierdzewnych](#)

[Korozja szczelinowa stali nierdzewnych](#)



Korozja mikrobiologiczna MIC – przyczyny, mechanizm i zapobieganie

[Korozja międzykrystaliczna stali nierdzewnej](#)

[Korozja naprężeniowa SCC](#)

[Korozja galwaniczna](#)

[Korozja erozyjna](#)

[Korozja kawitacyjna](#)

[Korozja zmęczeniowa](#)

[Korozja cierna](#)

[Korozja mikrobiologiczna MIC](#)

[Korozja wysokotemperaturowa](#)