



Korozja cierna – przyczyny, mechanizm i zapobieganie

Korozja cierna jest formą niszczenia powierzchni metalu wynikającą z jednoczesnego działania procesów korozyjnych oraz względnego ruchu dwóch stykających się powierzchni. Najczęściej pojawia się w połączeniach, w których występują niewielkie, powtarzające się przemieszczenia, drgania lub mikro-ruchy. W literaturze zjawisko to jest często określane jako **fretting corrosion**.

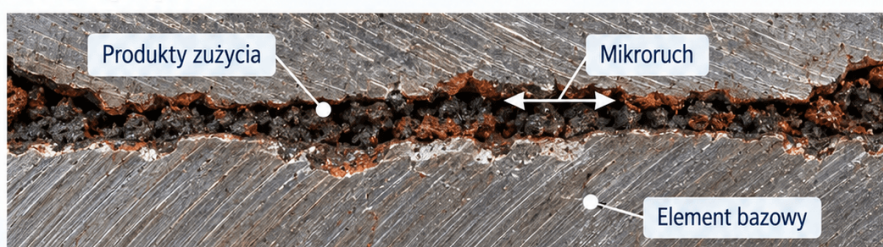


Korozja cierna

Uszkodzenia i utlenianie powierzchni powstające na styku elementów poddanych niewielkim, powtarzalnym mikroruchom.



Przekrój styku



Efekt:

Miejscowe uszkodzenia w strefie styku, powstawanie tlenków i drobnych cząstek zużyciowych.

Korozja cierna występuje przede wszystkim w połączeniach śrubowych, wpustach, łożyskach, połączeniach wciskowych, sprzęgłach, stykach elektrycznych oraz innych miejscach, w których dwie powierzchnie pozostają pod dociskiem i jednocześnie wykonują bardzo małe ruchy względem siebie.

Co to jest korozja cierna?

Korozja cierna jest wynikiem współdziałania:

- **sił tarcia,**



- **mikroruchów pomiędzy powierzchniami,**
- **utleniania lub innych procesów korozyjnych.**

Podczas wzajemnego przemieszczania powierzchni dochodzi do mechanicznego uszkodzania warstw ochronnych, tlenkowych lub pasywnych.

Odsłonięty metal może następnie reagować z tlenem, wilgocią lub innymi składnikami środowiska.

Powstające produkty korozji są ponownie rozcierane i usuwane przez ruch powierzchni.

Proces może powtarzać się tysiące lub miliony razy.

Jak powstaje korozja cierna?

Mechanizm można uprościć do kilku etapów:

1. dwie powierzchnie pozostają w kontakcie pod określonym naciskiem,
2. występują niewielkie ruchy względne lub drgania,
3. warstwa tlenkowa lub pasywna zostaje mechanicznie uszkodzona,
4. odsłonięty metal reaguje ze środowiskiem,
5. powstają produkty korozji,
6. kolejne ruchy powodują ich ścieranie i rozdrabnianie,
7. odsłaniania jest nowa powierzchnia metalu,
8. cykl wielokrotnie się powtarza.

W efekcie dochodzi do stopniowego ubytku materiału, zwiększenia luzów oraz pogorszenia warunków pracy połączenia.

Dlaczego niewielkie ruchy są szczególnie niebezpieczne?

Korozja cierna bardzo często rozwija się przy bardzo małych amplitudach ruchu. Nie jest więc konieczne duże przesuwanie jednej powierzchni po drugiej.

Wystarczające mogą być:

- drgania maszyny,
- mikroprzemieszczenia pod wpływem obciążenia,
- odkształcenia cieplne,
- zmiany ciśnienia,



- cykliczne obciążenia,
- niewielkie ruchy w połączeniu śrubowym lub wciskowym.

Małe ruchy mogą wystarczyć do wielokrotnego niszczenia warstwy ochronnej, a jednocześnie nie pozwalają produktom zużycia łatwo opuścić strefy kontaktu.

Fretting corrosion i fretting wear

Korozja cierna jest blisko związana z pojęciem **fretting wear**, czyli zużycia ciernego wywołanego małymi ruchami oscylacyjnymi.

Różnica polega na tym, że:

- **fretting wear** opisuje przede wszystkim mechaniczne zużycie powierzchni,
- **fretting corrosion** uwzględnia dodatkowo udział procesów utleniania i korozji.

W praktyce oba zjawiska często występują jednocześnie i trudno je całkowicie rozdzielić.

Rola warstwy tlenkowej

Na wielu metalach naturalnie powstaje warstwa tlenkowa.

W przypadku stali nierdzewnych jest to bardzo cienka warstwa pasywna zawierająca związki chromu.

Podczas mikroruchów warstwa ta może być cyklicznie:

- uszkodzana,
- ścierana,
- odtwarzana,
- ponownie niszczona.

Jeżeli proces mechanicznego usuwania jest szybszy niż skuteczna odbudowa powierzchni, może dochodzić do intensywnego zużycia.

Produkty korozji cierniej

Charakterystyczną cechą korozji cierniej jest powstawanie drobnych produktów zużycia i utleniania.

W przypadku stali mogą mieć one barwę:



- czerwono-brunatną,
- ciemnoczerwoną,
- brązową,
- czarną.

Produkty te mogą przypominać rdzę lub drobny proszek.

Ich obecność w miejscu styku może być jednym z pierwszych sygnałów rozwijającej się korozji cierniej.

Jak wygląda powierzchnia uszkodzona przez korozję cierną?

Na powierzchni mogą pojawiać się:

- matowe obszary,
- ciemne lub brunatne przebarwienia,
- rysy,
- lokalne wgłębienia,
- otarcia,
- drobne wykruszenia,
- ślady utlenionego proszku.

W bardziej zaawansowanym stadium może dochodzić do powstawania lokalnych ubytków materiału oraz zmiany geometrii powierzchni kontaktowej.

Gdzie najczęściej występuje korozja cierna?

Typowe miejsca występowania to:

- połączenia śrubowe,
- połączenia wciskowe,
- łożyska,
- wały i piasty,
- wpusty,
- wielowypusty,
- sprzęgła,
- kołnierze,
- styki elektryczne,



- połączenia rurowe,
- elementy turbin,
- elementy konstrukcji poddawane drganiom.

Korozja cierna w połączeniach śrubowych

Połączenia śrubowe są szczególnie podatne na korozję cierną, jeżeli występują w nich niewielkie względne ruchy.

Mogą być one powodowane przez:

- drgania,
- zmienne obciążenia,
- niewłaściwe dokręcenie śruby,
- odkształcenia konstrukcji,
- cykle cieplne.

Jeżeli docisk jest zbyt mały, powierzchnie mogą lokalnie przesuwać się względem siebie.

Jeżeli jest bardzo duży, wzrastają lokalne naprężenia kontaktowe.

Dlatego prawidłowy montaż ma bardzo duże znaczenie dla ograniczenia ryzyka.

Korozja cierna w połączeniach wciskowych

W połączeniach wciskowych mikro-ruchy mogą powstawać wskutek:

- obciążeń zmiennych,
- drgań,
- ugięcia wału,
- zmian temperatury,
- niewłaściwego pasowania.

Korozja cierna może pojawiać się na styku wału i piasty lub w innych powierzchniach montowanych na wcisk.

Z czasem może prowadzić do zwiększenia luzu i pogorszenia stabilności połączenia.

Korozja cierna w łożyskach

W łożyskach zjawisko może występować między pierścieniem łożyska a wałem lub



oprawą.

Jeżeli pierścień wykonuje niewielkie ruchy względem powierzchni osadzenia, może dochodzić do frettingu.

Objawem mogą być:

- ciemne ślady,
- rdzawy proszek,
- lokalne wytarcia,
- pogorszenie pasowania,
- zwiększenie drgań.

Korozja cierna styków elektrycznych

Korozja cierna może mieć również duże znaczenie w połączeniach elektrycznych. Niewielkie drgania mogą uszkadzać warstwę powierzchniową styków i powodować powstawanie tlenków.

Produkty utleniania mogą zwiększać opór elektryczny styku.

W efekcie mogą wystąpić:

- niestabilny kontakt,
- wzrost rezystancji,
- lokalne nagrzewanie,
- zakłócenia sygnału,
- awaria połączenia.

Wpływ nacisku kontaktowego

Nacisk między powierzchniami ma bardzo duże znaczenie.

Zbyt mały nacisk może umożliwiać większe względne przemieszczenia.

Z kolei bardzo duży nacisk może prowadzić do wysokich naprężeń kontaktowych oraz lokalnego odkształcenia powierzchni.

Najkorzystniejsze warunki zależą od:

- materiału,
- geometrii połączenia,
- rodzaju ruchu,
- amplitudy drgań,
- smarowania,



- temperatury.

Wpływ amplitudy ruchu

Korozja cierna jest szczególnie związana z małymi ruchami oscylacyjnymi. Zmiana amplitudy może prowadzić do zmiany dominującego mechanizmu zużycia. Przy bardzo małych amplitudach część powierzchni może pozostawać niemal nieruchoma, podczas gdy inne obszary ulegają lokalnemu poślizgowi. Przy większych amplitudach może pojawiać się pełniejsze przesuwanie powierzchni i intensywniejsze zużycie mechaniczne.

Wpływ częstotliwości drgań

Wzrost częstotliwości oznacza większą liczbę cykli tarcia w określonym czasie. Może to zwiększać szybkość niszczenia warstw powierzchniowych. Wpływ częstotliwości zależy jednak od:

- amplitudy ruchu,
- siły docisku,
- materiału,
- temperatury,
- środowiska,
- smarowania.

Wpływ wilgoci i tlenu

Wilgoć i tlen mogą zwiększać udział procesów korozyjnych. W szczelnie zamkniętej strefie kontaktu warunki mogą jednak zmieniać się w czasie wskutek zużywania tlenu, gromadzenia produktów korozji i ograniczonej wymiany medium. Dlatego rzeczywisty mechanizm może być bardziej złożony niż zwykłe ścieranie na otwartej powierzchni.

Stale nierdzewne a korozja cierna

Stale nierdzewne są chronione przez warstwę pasywną, ale warstwa ta może być niszczona mechanicznie. W połączeniach poddawanych drganiom lub mikroruchom może dochodzić do



wielokrotnego zrywania warstwy pasywnej.

Po każdym uszkodzeniu stal próbuje się repasywować.

Jeżeli powierzchnie nadal się przemieszczają, nowo utworzona warstwa może być ponownie usuwana.

Dlatego nawet bardzo dobra odporność na klasyczną korozję nie oznacza pełnej odporności na korozję cierną.

304L i 316L a korozja cierna

Stale **1.4307 / 304L** i **1.4404 / 316L** mają dobrą odporność korozyjną w wielu środowiskach.

316L wykazuje większą odporność na korozję lokalną w wielu środowiskach chlorkowych dzięki zawartości molibdenu.

W przypadku korozji cierniej o trwałości połączenia decydują jednak nie tylko właściwości korozyjne, ale również:

- nacisk powierzchniowy,
- amplituda ruchu,
- twardość,
- stan powierzchni,
- smarowanie,
- geometria połączenia.

Z tego powodu zmiana 304L na 316L nie zawsze rozwiązuje problem korozji cierniej.

Duplex 2205 a korozja cierna

Stal **1.4462 / duplex 2205** posiada wyższą wytrzymałość mechaniczną niż typowe stale austenityczne 304L i 316L.

Może to być korzystne w niektórych połączeniach narażonych na zużycie kontaktowe.

Jednocześnie dobra odporność na korozję lokalną może ograniczać udział procesów elektrochemicznych.

Nie oznacza to jednak całkowitej odporności na fretting.

Jeżeli występują nieprawidłowe warunki kontaktu, drgania i mikro-ruchy, również powierzchnia duplex może ulegać zużyciu.



Korozja cierna a korozja szczelinowa

Oba mechanizmy mogą rozwijać się w miejscach styku powierzchni, ale mają inne podstawowe przyczyny.

Cecha	Korozja cierna	Korozja szczelinowa
Główny czynnik	mikro-ruchy i tarcie	stagnacja medium w wąskiej szczelinie
Ruch powierzchni	charakterystyczny	nie jest wymagany
Mechanizm	mechaniczne niszczenie powierzchni i korozja	różnice chemiczne pomiędzy wnętrzem szczeliny a otoczeniem
Typowe miejsce	połączenia poddawane drganiom	uszczelki, zakładki, połączenia śrubowe, osady

Korozja cierna a korozja erozyjna

Korozja cierna i erozyjna również nie są tym samym zjawiskiem.

Cecha	Korozja cierna	Korozja erozyjna
Źródło ruchu	ruch dwóch stykających się powierzchni	przepływające medium
Typowa amplituda	bardzo mała	nie dotyczy ruchu kontaktowego powierzchni
Typowe miejsca	łożyska, połączenia śrubowe, wały, styki	rurociągi, kolana, pompy, zawory



Korozja cierna a zużycie adhezyjne

Zużycie adhezyjne powstaje wtedy, gdy lokalne nierówności dwóch powierzchni łączą się ze sobą, a podczas ruchu następuje ich zrywanie.

Może prowadzić do przenoszenia materiału między powierzchniami oraz powstawania zatarć.

W korozji ciernej ruch jest zwykle niewielki i oscylacyjny, a istotną rolę odgrywa również utlenianie produktów zużycia.

Oba mechanizmy mogą jednak występować jednocześnie.

Korozja cierna a korozja zmęczeniowa

Długotrwały fretting może prowadzić do powstania lokalnych uszkodzeń powierzchni, które następnie stają się miejscami koncentracji naprężeń.

Jeżeli element jest jednocześnie poddawany cyklicznym obciążeniom, może rozwinąć się **fretting fatigue**, czyli zmęczenie cierne.

Proces ten może prowadzić do inicjacji pęknięć zmęczeniowych w strefie kontaktu. Dlatego korozja cierna i zmęczenie mogą wzajemnie się wzmacniać.

Jak zapobiegać korozji ciernej?

Najważniejszym sposobem ograniczenia korozji ciernej jest zmniejszenie lub wyeliminowanie względnego ruchu pomiędzy powierzchniami.

Można to osiągnąć przez:

- prawidłowe dokręcanie połączeń śrubowych,
- właściwe pasowanie elementów,
- ograniczenie drgań,
- eliminowanie rezonansu,
- zwiększenie sztywności konstrukcji,
- prawidłowe podparcie elementów,
- stosowanie odpowiedniego smarowania,
- dobór właściwych materiałów pary ciernej,
- stosowanie odpowiednich powłok powierzchniowych,
- zmniejszenie koncentracji naprężeń,
- kontrolę stanu powierzchni.



Rola smarowania

Smarowanie może ograniczać bezpośredni kontakt powierzchni oraz zmniejszać współczynnik tarcia.

Może również ograniczać dostęp wilgoci i tlenu do strefy kontaktu.

Skuteczność smarowania zależy jednak od:

- rodzaju ruchu,
- nacisku,
- temperatury,
- materiału powierzchni,
- rodzaju środka smarnego.

Przy bardzo małych ruchach i wysokim nacisku środek smarny może być stopniowo wypierany ze strefy kontaktu, dlatego jego dobór powinien odpowiadać rzeczywistym warunkom eksploatacji.

Znaczenie powłok ochronnych

Powłoki mogą zmniejszać tarcie, zwiększać twardość powierzchni albo oddzielać od siebie dwa materiały.

W zależności od zastosowania wykorzystuje się między innymi:

- powłoki metaliczne,
- powłoki twarde,
- powłoki niskotarciowe,
- warstwy smarne,
- obróbki powierzchniowe zwiększające twardość.

Powłoka musi jednak dobrze przylegać do podłoża i być odporna na powtarzające się obciążenia kontaktowe.

Dlaczego sam wybór stali nierdzewnej może nie wystarczyć?

Korozja cierna nie jest wyłącznie problemem odporności chemicznej materiału. Nawet stal nierdzewna o bardzo wysokiej odporności korozyjnej może ulegać intensywnemu frettingowi, jeżeli:



- występują drgania,
- połączenie jest niewłaściwie spasowane,
- docisk jest nieprawidłowy,
- brakuje odpowiedniego smarowania,
- powierzchnie wykonują ciągłe mikro-ruchy.

Dlatego skuteczna ochrona wymaga przede wszystkim poprawy konstrukcji i warunków pracy połączenia.

Jak wykrywać korozję cierną?

Do oceny stanu połączeń stosuje się:

- oględziny powierzchni,
- kontrolę obecności brunatnych lub ciemnych produktów zużycia,
- pomiary luzów,
- kontrolę drgań,
- ocenę stanu powierzchni po demontażu,
- badania mikroskopowe w przypadku analizy uszkodzeń.

W elementach krytycznych warto kontrolować miejsca narażone na fretting jeszcze zanim pojawią się widoczne luzy lub pęknięcia.

Korozja cierna – najważniejsze wnioski

Korozja cierna powstaje wskutek jednoczesnego działania **mikroruchów, tarcia i procesów korozyjnych**.

Najczęściej rozwija się pomiędzy dwiema powierzchniami pozostającymi pod dociskiem i wykonującymi bardzo niewielkie ruchy względem siebie.

Cykliczne tarcie niszczy warstwy ochronne, odsłania świeży metal i powoduje powstawanie produktów utleniania, które następnie są ponownie rozcierane.

Typowymi miejscami występowania są **połączenia śrubowe, łożyska, połączenia wciskowe, wały, piasty, styki elektryczne i elementy poddawane drganiom**.

W przypadku stali nierdzewnych warstwa pasywna może być wielokrotnie niszczona i odtwarzana, dlatego sama wysoka odporność korozyjna nie gwarantuje odporności na fretting.

Najskuteczniejszym sposobem ograniczenia korozji cierniej jest **eliminowanie**



mikroruchów, prawidłowy dobór pasowania i docisku, ograniczanie drgań oraz odpowiednie smarowanie i przygotowanie powierzchni.

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 międzykrystaliczna stali nierdzewnej](#)

[Korozja naprężeniowa SCC](#)

[Korozja galwaniczna](#)

[Korozja erozyjna](#)

[Korozja kawitacyjna](#)

[Korozja zmęczeniowa](#)

[Korozja cierna](#)

[Korozja mikrobiologiczna MIC](#)

[Korozja wysokotemperaturowa](#)