



Korozja naprężeniowa SCC – przyczyny, mechanizm i odporność stali nierdzewnych

Korozja naprężeniowa SCC – Stress Corrosion Cracking – jest szczególnie niebezpieczną formą niszczenia metali, w której jednoczesne działanie środowiska korozyjnego i naprężeń rozciągających prowadzi do powstawania oraz rozwoju



pęknięć.

SCC może występować nawet wtedy, gdy ogólna utrata materiału wskutek korozji jest niewielka. Element może wyglądać prawidłowo, a jednocześnie w jego



strukturze rozwijają się pęknięcia zdolne doprowadzić do nagłej awarii. Problem ten ma szczególne znaczenie w przypadku **austenitycznych stali nierdzewnych**, takich jak 1.4301 / 304, 1.4307 / 304L, 1.4401 / 316 czy 1.4404 / 316L, pracujących w podwyższonej temperaturze w środowisku zawierającym chlorki.

Co to jest korozja naprężeniowa SCC?

Korozja naprężeniowa jest procesem pękania materiału wywołanym jednoczesnym działaniem:

- materiału podatnego na SCC,
- odpowiednio agresywnego środowiska,
- naprężeń rozciągających.

Dopiero współwystępowanie tych czynników stwarza warunki sprzyjające rozwojowi SCC.

Materiał może wykazywać bardzo dobrą odporność korozyjną bez naprężeń albo wysoką wytrzymałość mechaniczną w obojętnym środowisku, a mimo to ulec pękaniu, gdy oba czynniki wystąpią jednocześnie.

Trzy warunki powstania SCC

Warunek	Znaczenie
Podatny materiał	Nie wszystkie stale i stopy reagują jednakowo na dane środowisko
Środowisko korozyjne	Dla stali nierdzewnych szczególnie istotne są środowiska chlorkowe
Naprężenia rozciągające	Mogą pochodzić z obciążenia roboczego, spawania, gięcia, obróbki plastycznej lub montażu

Usunięcie jednego z tych trzech czynników może znacząco zmniejszyć ryzyko korozji naprężeniowej.



Korozja naprężeniowa chlorkowa - chloride SCC

Najbardziej znaną postacią SCC występującą w stalach nierdzewnych jest **korozja naprężeniowa wywołana chlorkami**, określana jako chloride stress corrosion cracking – Cl-SCC lub CSCC.

Chlorki mogą pochodzić między innymi z:

- wody morskiej,
- solanki,
- wody technologicznej,
- środków czyszczących,
- soli drogowej,
- wód chłodniczych,
- procesów chemicznych,
- zanieczyszczeń osadzających się na powierzchni urządzeń.

Szczególnie podatne na chloride SCC są standardowe austenityczne stale nierdzewne, takie jak **304/304L i 316/316L**.

Wpływ temperatury na SCC

Ryzyko chloride SCC silnie wzrasta wraz ze wzrostem temperatury.

W praktyce dla standardowych austenitycznych stali nierdzewnych szczególną uwagę zwraca się na temperatury powyżej około **50-60°C**.

Nie jest to jednak sztywna granica bezpieczeństwa.

W warunkach umożliwiających koncentrację chlorków, na przykład podczas odparowywania wody albo pod izolacją cieplną, SCC może wystąpić również w niższej temperaturze.

Dlatego nie można przyjąć zasady, że stal 304 lub 316 poniżej 60°C jest automatycznie odporna na pękanie naprężeniowe.

Dlaczego odparowanie wody zwiększa zagrożenie?

Szczególnie niebezpieczne są powierzchnie, na których woda zawierająca niewielkie ilości chlorków okresowo odparowuje.

Woda znika, natomiast chlorki pozostają na powierzchni.



Kolejne cykle zwilżania i wysychania mogą prowadzić do znacznego zwiększenia lokalnego stężenia soli.

W rezultacie medium, które początkowo zawierało niewielkie ilości chlorków, może lokalnie stać się bardzo agresywne.

Typowym przykładem są:

- gorące rurociągi,
- zbiorniki,
- wymienniki ciepła,
- powierzchnie pod izolacją cieplną,
- instalacje narażone na rozpylanie słonej wody.

Korozja naprężeniowa pod izolacją

Jednym z typowych miejsc występowania SCC jest powierzchnia rurociągów i urządzeń znajdujących się pod izolacją cieplną.

Jeżeli do izolacji przedostanie się woda zawierająca chlorki, może ona kontaktować się z gorącą powierzchnią stali.

Podczas odparowywania wody stężenie chlorków zwiększa się, tworząc warunki sprzyjające chloride SCC.

Zjawisko to może być związane z szerszym problemem określanym jako **CUI - Corrosion Under Insulation**, czyli korozja pod izolacją.

Skąd biorą się naprężenia powodujące SCC?

Do powstania SCC potrzebne są naprężenia rozciągające, ale nie muszą one pochodzić wyłącznie z normalnego obciążenia konstrukcji.

Bardzo istotne są również **naprężenia własne** pozostające w materiale po procesach technologicznych.

Źródłem naprężeń mogą być:

- spawanie,
- gięcie,
- tłoczenie,
- walcowanie,
- obróbka skrawaniem,
- prostowanie,
- montaż elementów,



- nierównomierne nagrzewanie i chłodzenie,
- obciążenia eksploatacyjne.

Dlatego element może być podatny na SCC nawet wtedy, gdy podczas eksploatacji nie jest poddany szczególnie dużemu zewnętrznemu obciążeniu.

Spawanie a korozja naprężeniowa

Spawanie ma duże znaczenie dla SCC, ponieważ może pozostawić w materiale znaczne naprężenia rozciągające.

W pobliżu spoiny występują:

- naprężenia własne,
- zmiany strukturalne,
- lokalne koncentracje naprężeń,
- nierówności powierzchni,
- możliwość powstawania osadów i szczelin.

Jeżeli jednocześnie występują chlorki i odpowiednio wysoka temperatura, okolice spoin mogą stać się szczególnie podatne na rozwój SCC.

Jak rozwija się pęknięcie SCC?

Pęknięcie naprężeniowe często rozpoczyna się od niewielkiej nieciągłości powierzchni lub lokalnego uszkodzenia warstwy pasywnej.

Miejscem inicjacji może być między innymi:

- wżer korozyjny,
- rysa,
- karb,
- spoina,
- strefa wpływu ciepła,
- miejsce koncentracji naprężeń,
- lokalny osad.

Pęknięcie może następnie rozwijać się pod wpływem jednoczesnego działania środowiska i naprężenia.

W przeciwieństwie do zwykłej korozji równomiernej ubytek metalu może być bardzo



niewielki, mimo że pęknięcie osiąga znaczną głębokość.

Korozja wżerowa a SCC

Korozja wżerowa i SCC są różnymi mechanizmami, ale mogą być ze sobą związane. W środowisku chlorkowym wżer może działać jako miejsce koncentracji naprężeń i stać się punktem inicjacji pęknięcia naprężeniowego.

Dlatego zwiększenie odporności stali na korozję wżerową może jednocześnie ograniczać prawdopodobieństwo powstania miejsca inicjacji SCC.

Nie oznacza to jednak, że wysoka wartość PREN automatycznie gwarantuje odporność na SCC.

Pękanie transkrystaliczne i międzykrystaliczne

Pęknięcia SCC mogą rozwijać się różnymi drogami.

Wyróżnia się między innymi:

- **pękanie transkrystaliczne** – pęknięcie przechodzi przez ziarna materiału,
- **pękanie międzykrystaliczne** – pęknięcie rozwija się wzdłuż granic ziaren.

Charakter pękania zależy od materiału, jego struktury, środowiska oraz warunków eksploatacyjnych.

Chlorkowe SCC austenitycznych stali nierdzewnych bardzo często ma charakter transkrystaliczny.

304 i 304L a korozja naprężeniowa

Stale **1.4301 / 304** i **1.4307 / 304L** należą do najczęściej stosowanych austenitycznych stali nierdzewnych.

W środowiskach chlorkowych przy podwyższonej temperaturze obydwa gatunki mogą być podatne na SCC.

Niska zawartość węgla w 304L ogranicza ryzyko korozji międzykrystalicznej po spawaniu, ale **nie zapewnia odporności na chloride SCC**.

Jest to bardzo ważne rozróżnienie.

Oznaczenie „L” nie oznacza stali odpornej na pękanie naprężeniowe.



316 i 316L a korozja naprężeniowa

Stale **1.4401 / 316** i **1.4404 / 316L** zawierają molibden, dzięki czemu mają większą odporność na korozję wżerową niż 304 i 304L.

Nie oznacza to jednak pełnej odporności na chloride SCC.

316L może być bardzo dobrym materiałem w wielu środowiskach chlorkowych przy umiarkowanej temperaturze, lecz przy odpowiednim połączeniu:

- temperatury,
- stężenia chlorków,
- naprężeń,
- czasu ekspozycji

również może ulec pękaniu naprężeniowemu.

Porównanie 304L, 316L, 904L i stali duplex

Gatunek	Typ stali	Odporność na chloride SCC
1.4307 / 304L	austenityczna	ograniczona
1.4404 / 316L	austenityczna Mo	ograniczona
1.4539 / 904L	wysokostopowa austenityczna	wyższa
1.4529 / Alloy 926	wysokostopowa austenityczna	wysoka
1.4547 / 254 SMO	wysokostopowa austenityczna	wysoka
1.4462 / duplex 2205	duplex	znacznie wyższa niż 304L i 316L
1.4410 / superduplex 2507	superduplex	bardzo wysoka



Dlaczego stale duplex są odporniejsze na SCC?

Stale duplex mają strukturę złożoną z dwóch faz:

- austenitu,
- ferrytu.

Taka struktura zapewnia znacznie większą odporność na chloride SCC niż w przypadku klasycznych stali austenitycznych 304L i 316L.

Przykładem jest **1.4462 / duplex 2205**, który charakteryzuje się wysoką odpornością na pękanie naprężeniowe w środowiskach zawierających chlorki. Jeszcze większą odporność wykazują gatunki superduplex, takie jak **1.4410 / 2507**. Nie oznacza to jednak całkowitej odporności w każdych warunkach. Bardzo wysoka temperatura, agresywne środowisko oraz nieprawidłowa struktura materiału mogą również ograniczać trwałość stali duplex.

Wpływ niklu na odporność na SCC

Zawartość niklu ma duże znaczenie dla odporności austenitycznych stali nierdzewnych na chloride SCC.

Klasyczne stale 304 i 316 zawierające około 8-14% niklu należą do grup szczególnie podatnych na ten mechanizm.

Zwiększenie zawartości niklu w wysokostopowych stalach austenitycznych może znacząco poprawić odporność na pękanie naprężeniowe.

Dlatego gatunki takie jak:

- 1.4539 / 904L,
- 1.4529 / Alloy 926,
- 1.4547 / 254 SMO

wykazują większą odporność na chloride SCC niż klasyczne stale 304L i 316L.

Czy 904L jest odporna na SCC?

Stal **1.4539 / 904L** dzięki wysokiej zawartości niklu, chromu i molibdenu ma zdecydowanie większą odporność na SCC niż standardowe stale 304 i 316.

Nie należy jednak określać jej jako całkowicie odpornej na korozję naprężeniową. Przy odpowiednio agresywnych warunkach – wysokiej temperaturze, dużym



stężeniu chlorków i znacznych naprężeniach – również wysokostopowe stale austenityczne mogą ulegać SCC.

Czy 254 SMO i Alloy 926 są odporne na SCC?

Stale **1.4547 / 254 SMO** i **1.4529 / Alloy 926** należą do wysokostopowych austenitycznych stali nierdzewnych o bardzo dobrej odporności na korozję lokalną. Ich wysoka zawartość niklu oraz molibdenu zwiększa również odporność na chloride SCC.

Są dlatego stosowane w znacznie bardziej agresywnych środowiskach niż klasyczne 304L i 316L.

Także w tym przypadku odporność nie jest jednak absolutna i zawsze należy uwzględnić konkretne warunki procesu.

Korozja naprężeniowa a PREN

Wskaźnik **PREN** stosowany jest przede wszystkim do orientacyjnego porównywania odporności stali nierdzewnych na korozję wżerową.

Wyższy PREN zwykle oznacza większą odporność na inicjację wżerów w środowisku chlorkowym.

Nie należy jednak stosować PREN jako bezpośredniego wskaźnika odporności na SCC.

Odporność na korozję naprężeniową zależy również od:

- struktury materiału,
- zawartości niklu,
- poziomu naprężeń,
- temperatury,
- rodzaju środowiska,
- stanu powierzchni,
- historii cieplnej materiału.

Dlatego dwa gatunki o podobnym PREN mogą wykazywać inną odporność na SCC.

Korozja naprężeniowa a korozja



międzykrystaliczna

SCC i korozja międzykrystaliczna nie są tym samym zjawiskiem.

Cecha	Korozja naprężeniowa SCC	Korozja międzykrystaliczna
Główny czynnik	środowisko + naprężenie rozciągające	lokalne zmiany składu przy granicach ziaren
Typowe środowisko	chlorki przy podwyższonej temperaturze	środowisko zdolne atakować uwrażliwione granice ziaren
Wpływ naprężenia	konieczny do rozwoju SCC	nie jest warunkiem koniecznym
304L i 316L	nadal mogą być podatne	niska zawartość węgla ogranicza podatność

Dlaczego SCC jest tak niebezpieczna?

Korozja naprężeniowa może rozwijać się przy bardzo niewielkiej ogólnej utracie materiału.

Nie musi pojawić się intensywna rdza ani znaczny ubytek grubości ścianki.

Pęknięcie może natomiast rozwijać się coraz głębiej, aż pozostały przekrój elementu nie będzie w stanie przenieść obciążenia.

Może to prowadzić do:

- nagłego pęknięcia rurociągu,
- rozszczelnienia zbiornika,
- awarii wymiennika ciepła,
- wycieku agresywnego medium,
- zniszczenia elementu konstrukcyjnego.



Jak ograniczyć ryzyko korozji naprężeniowej?

Ryzyko SCC można ograniczać na kilka sposobów:

- dobierając materiał odporniejszy na dane środowisko,
- ograniczając zawartość chlorków,
- obniżając temperaturę pracy,
- ograniczając naprężenia rozciągające,
- unikając ostrych korbów i miejsc koncentracji naprężeń,
- kontrolując technologię spawania,
- ograniczając naprężenia własne po obróbce,
- zapobiegając koncentracji chlorków wskutek odparowania,
- zapewniając prawidłowe odwodnienie powierzchni,
- zapobiegając przenikaniu wody pod izolację,
- stosując stale duplex lub wysokostopowe stale austenityczne w bardziej wymagających warunkach.

Czy redukcja naprężeń eliminuje SCC?

Zmniejszenie naprężeń rozciągających może znacząco ograniczyć prawdopodobieństwo wystąpienia SCC.

W praktyce nie zawsze możliwe jest jednak całkowite usunięcie naprężeń.

Pozostają one często po:

- spawaniu,
- formowaniu na zimno,
- gięciu,
- prostowaniu,
- montażu.

Dlatego w wielu instalacjach bezpieczniejszym rozwiązaniem jest jednocześnie ograniczenie agresywności środowiska oraz zastosowanie materiału o większej odporności na SCC.

Badania odporności na SCC

Odporność materiałów na korozję naprężeniową bada się w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych.



Próbki mogą być poddawane:

- stałemu obciążeniu,
- stałemu odkształceniu,
- powolnemu rozciąganiu,
- działaniu określonego środowiska korozyjnego.

W badaniach chloride SCC stosuje się między innymi roztwory chlorków oraz podwyższoną temperaturę w celu przyspieszenia procesu.

Wyniki badań należy zawsze odnosić do konkretnego środowiska i warunków eksploatacji. Odporność wykazana w jednym medium nie oznacza automatycznej odporności na SCC w każdym innym środowisku.

SCC w obecności siarkowodoru H₂S

Pękanie związane z siarkowodorem jest szczególnie ważne w przemyśle naftowym i gazowym.

W środowiskach zawierających H₂S mogą występować mechanizmy związane z wnikaniem wodoru do materiału.

Takie warunki określone są często jako **sour service**.

Przy doborze materiału bierze się wtedy pod uwagę między innymi:

- ciśnienie cząstkowe H₂S,
- temperaturę,
- pH,
- zawartość chlorków,
- naprężenia,
- wytrzymałość i [twardość materiału](#).

Nie należy utożsamiać pękania wywołanego H₂S z klasycznym chloride SCC, ponieważ mechanizmy mogą być odmienne.

Jakie stale wybrać przy zagrożeniu SCC?

Wybór materiału zależy od temperatury, stężenia chlorków, pH, naprężeń oraz pozostałych składników środowiska.

W warunkach, w których klasyczne stale 304L i 316L wykazują zbyt małą odporność, rozważa się między innymi:



- **1.4539 / 904L,**
- **1.4529 / Alloy 926,**
- **1.4547 / 254 SMO,**
- **1.4462 / duplex 2205,**
- **1.4410 / superduplex 2507,**
- stopy niklu w szczególnie agresywnych środowiskach.

Nie istnieje jednak jeden gatunek odpowiedni do wszystkich warunków. Dobór materiału powinien zawsze uwzględniać rzeczywiste parametry pracy instalacji.

Korozja naprężeniowa SCC - najważniejsze wnioski

Korozja naprężeniowa SCC powstaje wskutek jednoczesnego działania **podatnego materiału, agresywnego środowiska i naprężeń rozciągających**.

Dla standardowych austenitycznych stali nierdzewnych szczególnie niebezpieczne są środowiska chlorkowe w podwyższonej temperaturze.

Stale **304, 304L, 316 i 316L** mogą ulegać chloride SCC, mimo że wykazują dobrą odporność korozyjną w wielu innych warunkach.

Niska zawartość węgla w gatunkach 304L i 316L ogranicza przede wszystkim podatność na korozję międzykrystaliczną i **nie eliminuje zagrożeń SCC**.

Znacznie większą odporność na pękanie naprężeniowe w środowiskach chlorkowych wykazują stale duplex, superduplex oraz wysokostopowe stale austenityczne o zwiększonej zawartości niklu.

W praktyce najważniejsze jest jednoczesne kontrolowanie **materiału, temperatury, środowiska oraz naprężeń**.

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 zmęzeniowa](#)

[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**](#)