



Korozja szczelinowa stali nierdzewnych - przyczyny, mechanizm i odporne gatunki stali

Korozja szczelinowa jest jedną z najgroźniejszych form korozji miejscowej stali nierdzewnych. Rozwija się w wąskich przestrzeniach, do których dostęp tlenu i swobodna wymiana medium są ograniczone. Typowymi miejscami jej występowania są przestrzenie pod uszczelkami, podkładkami, kołnierzami, osadami, śrubami, zaciskami oraz w połączeniach zakładkowych.



Korozja szczelinowa

Korozja rozwijająca się w wąskich, trudno dostępnych szczelinach, np. pod uszczelką lub w połączeniach zakładkowych.



Przekrój połączenia



Efekt:

Szybko postępujące uszkodzenia w ukrytych strefach, trudne do zauważenia podczas zwykłych oględzin.

Problem jest szczególnie istotny w środowiskach zawierających chlorki, takich jak woda morską, solanki, woda technologiczna oraz liczne instalacje przemysłu chemicznego. Stal nierdzewna może pozostawać całkowicie odporna na otwartej powierzchni, a jednocześnie intensywnie korodować kilka milimetrów dalej – wewnątrz niewielkiej szczeliny.

Korozja szczelinowa jest mechanizmem zbliżonym do [korozji wżerowej](#), jednak warunki wewnątrz szczeliny sprzyjają powstawaniu agresywnego mikrośrodowiska. Z tego względu korozja szczelinowa może rozpocząć się przy niższej temperaturze lub mniejszej zawartości chlorków niż korozja wżerowa.



Co to jest korozja szczelinowa?

Korozja szczelinowa to lokalne niszczenie powierzchni metalu zachodzące w wąskich szczelinach lub pod osadami, gdzie występuje ograniczona wymiana roztworu z otaczającym środowiskiem.

Może powstawać zarówno pomiędzy dwoma powierzchniami metalowymi, jak i pomiędzy metalem a materiałem niemetalicznym. Typowym przykładem jest stalowa powierzchnia znajdująca się pod uszczelką z tworzywa sztucznego lub elastomeru.

Sama obecność szczeliny nie oznacza jeszcze, że korozja musi wystąpić. Ryzyko zależy jednocześnie od geometrii szczeliny, rodzaju materiału, składu medium, temperatury, zawartości chlorków, obecności tlenu oraz czasu pozostawiania cieczy w szczelinie.

Gdzie najczęściej występuje korozja szczelinowa?

Typowe miejsca powstawania korozji szczelinowej to:

- przestrzenie pod uszczelkami,
- połączenia kołnierzowe,
- przestrzenie pod podkładkami i śrubami,
- połączenia zakładkowe blach,
- gwinty,
- miejsca pod obejmami i zaciskami,
- obszary pod osadami mineralnymi,
- miejsca pod biofilmem i zanieczyszczeniami organicznymi,
- martwe przestrzenie instalacji,
- niepełne przetopy i niekorzystnie wykonane połączenia spawane,
- powierzchnie pod izolacją lub powłoką, jeżeli dostanie się pod nią wilgoć.

Szczególnie niebezpieczne są miejsca, w których ciecz może dostać się do wąskiej przestrzeni, ale jej późniejsze wypłukanie lub wymiana są utrudnione.

Jak powstaje korozja szczelinowa?

Na początku zarówno powierzchnia znajdująca się wewnątrz szczeliny, jak i powierzchnia znajdująca się poza nią mogą pozostawać w stanie pasywnym. Stal nierdzewna jest chroniona cienką warstwą pasywną bogatą w związki chromu.



Po zamknięciu niewielkiej ilości elektrolitu w szczelinie rozpoczynają się jednak procesy prowadzące do stopniowego pogarszania warunków wewnątrz tej przestrzeni.

1. Zużycie tlenu wewnątrz szczeliny

Tlen znajdujący się w cieczy wewnątrz szczeliny jest stopniowo zużywany. Ze względu na ograniczoną wymianę medium nie jest uzupełniany tak szybko jak na swobodnie dostępnej powierzchni.

Powstaje różnica pomiędzy dobrze natlenioną powierzchnią zewnętrzną a ubogim w tlen wnętrzem szczeliny.

2. Powstanie obszaru anodowego

Wnętrze szczeliny zaczyna zachowywać się anodowo względem dużej, natlenionej powierzchni znajdującej się poza nią.

Rozpoczyna się lokalne rozpuszczanie metalu i wzrost stężenia jonów metali wewnątrz szczeliny.

3. Migracja chlorków

W celu zachowania równowagi elektrycznej do szczeliny przemieszczają się jony ujemne. W środowisku zawierającym chlorki są to przede wszystkim jony Cl^- .

Ich stężenie wewnątrz szczeliny może stać się znacznie większe niż w otaczającym roztworze.

4. Spadek pH

Hydroliza jonów metali prowadzi do zakwaszenia roztworu znajdującego się wewnątrz szczeliny. Jednocześnie wzrost stężenia chlorków zwiększa agresywność powstającego mikrośrodowiska.

Warunki wewnątrz szczeliny stają się więc zupełnie inne niż w głównej objętości medium.

5. Utrata pasywności

Po osiągnięciu odpowiednio agresywnych warunków warstwa pasywna przestaje być stabilna. Rozpoczyna się intensywne lokalne rozpuszczanie materiału.

Proces może następnie sam się podtrzymywać – rozpuszczanie metalu powoduje



dalsze zakwaszanie środowiska i zwiększanie koncentracji chlorków wewnątrz szczeliny.

Korozja szczelinowa a korozja wżerowa

Korozja wżerowa i szczelinowa są ze sobą blisko związane. W obu przypadkach dochodzi do lokalnego uszkodzenia warstwy pasywnej oraz rozwoju agresywnego środowiska bogatego w chlorki.

Istnieje jednak podstawowa różnica: w przypadku korozji szczelinowej niekorzystne warunki są tworzone przez geometrię konstrukcji lub obecność osadu.

Cecha	Korozja wżerowa	Korozja szczelinowa
Miejsce powstawania	Otwarta powierzchnia metalu	Szczeliny, przestrzenie pod uszczelkami, osadami i połączeniami
Charakter uszkodzenia	Punktowe wżery	Lokalny atak obejmujący powierzchnię wewnątrz szczeliny
Znaczenie chlorków	Bardzo duże	Bardzo duże
Wpływ Cr, Mo i N	Zwiększają odporność	Zwiększają odporność
Temperatura inicjacji	Opisywana m.in. przez CPT	Opisywana m.in. przez CCT

Korozja szczelinowa może być bardziej wymagającym problemem niż korozja wżerowa. W praktyce materiał odporny na powstawanie wżerów na otwartej powierzchni nie musi być wystarczająco odporny wewnątrz ciasnej szczeliny.

Co oznacza CCT - Critical Crevice Temperature?

Jednym z parametrów stosowanych do porównywania odporności materiałów jest CCT - Critical Crevice Temperature, czyli krytyczna temperatura korozji szczelinowej.

Jest to temperatura wyznaczana w określonych warunkach badania, powyżej której rozpoczyna się korozja szczelinowa badanego materiału.



Im wyższa wartość CCT w tym samym teście, tym większa odporność materiału na inicjację korozji szczelinowej.

Nie należy jednak traktować CCT jako uniwersalnej maksymalnej temperatury pracy materiału. Wynik zależy między innymi od zastosowanej procedury badawczej, roztworu, konstrukcji szczeliny i czasu badania.

CCT a CPT

[CPT – Critical Pitting Temperature](#) – opisuje krytyczną temperaturę inicjacji korozji wżerowej, natomiast CCT odnosi się do korozji szczelinowej.

W wielu warunkach korozja szczelinowa może rozpocząć się przy temperaturze niższej niż korozja wżerowa. Jest to jeden z powodów, dla których przy projektowaniu instalacji zawierających uszczelki, kołnierze i inne szczeliny nie można opierać doboru materiału wyłącznie na odporności na wżery.

Wpływ chlorków na korozję szczelinową

Chlorki są jednym z najważniejszych czynników zwiększających ryzyko korozji szczelinowej stali nierdzewnych.

Występują między innymi w:

- wodzie morskiej,
- solankach,
- wodach chłodzących,
- wodzie basenowej,
- instalacjach odsalania,
- procesach chemicznych,
- przemyśle spożywczym,
- instalacjach oczyszczania i uzdatniania wody.

Problem polega na tym, że stężenie chlorków wewnątrz szczeliny może być znacznie większe niż w głównej objętości roztworu.

Dlatego analiza wyłącznie nominalnej zawartości chlorków w medium nie zawsze wystarcza do oceny bezpieczeństwa materiału.



Wpływ temperatury

Wzrost temperatury zwykle zwiększa ryzyko korozji szczelinowej. Materiał zachowujący się prawidłowo w zimnej wodzie zawierającej chlorki może zacząć korodować po podwyższeniu temperatury.

Przy doborze stali należy zatem analizować jednocześnie temperaturę i zawartość chlorków, a nie traktować tych parametrów oddzielnie.

Wpływ zastoju medium

Korozji szczelinowej sprzyja stagnacja cieczy. Brak wymiany medium ułatwia powstanie różnicy stężenia tlenu oraz rozwój agresywnego środowiska wewnątrz szczeliny.

Z tego powodu instalacje powinny być konstruowane tak, aby ograniczać martwe przestrzenie i miejsca gromadzenia się cieczy oraz osadów.

Korozja pod osadami

Do powstania klasycznej szczeliny nie jest konieczne mechaniczne połączenie dwóch elementów. Podobne warunki mogą powstać pod osadem znajdującym się na powierzchni stali.

Osady mineralne, produkty procesu technologicznego, kamień, biofilm czy zanieczyszczenia mogą ograniczyć dostęp tlenu oraz wymianę medium.

Pod warstwą osadu może powstać środowisko sprzyjające korozji szczelinowej, mimo że sąsiednia, czysta powierzchnia materiału pozostaje w dobrym stanie.

Jak skład stali wpływa na odporność na korozję szczelinową?

Najważniejszymi pierwiastkami stopowymi zwiększającymi odporność stali nierdzewnych na korozję szczelinową są chrom, molibden i azot.

Szczególnie istotne są molibden i azot. Dlatego stale wysoko molibdenowe, stale superaustenityczne oraz stale duplex i superduplex wykazują zdecydowanie większą odporność niż standardowe stale 304 i 316L.



PREN a korozja szczelinowa

Do wstępnego porównania odporności stali nierdzewnych na korozję miejscową wykorzystuje się wskaźnik PREN – Pitting Resistance Equivalent Number.

Jednym z najczęściej stosowanych wzorów jest:

$$\text{PREN} = \% \text{Cr} + 3,3 \times \% \text{Mo} + 16 \times \% \text{N}$$

Wraz ze wzrostem zawartości chromu, molibdenu i azotu zazwyczaj wzrasta odporność na korozję wżerową i szczelinową.

PREN jest jednak wskaźnikiem porównawczym, a nie kompletnym modelem odporności korozyjnej. Nie uwzględnia wszystkich czynników materiałowych i środowiskowych, dlatego nie powinien samodzielnie decydować o wyborze gatunku.

304 - 1.4301

Stal 1.4301 / AISI 304 jest podstawową austenityczną stalą nierdzewną zawierającą około 18% chromu i 8–10% niklu.

Sprawdza się bardzo dobrze w wielu umiarkowanych środowiskach, jednak jej odporność na korozję miejscową w obecności chlorków jest stosunkowo ograniczona.

W środowiskach zawierających wodę morską, solanki lub większe stężenia chlorków 304 nie powinna być traktowana jako materiał o wysokiej odporności na korozję szczelinową.

316L - 1.4404

1.4404 / AISI 316L zawiera molibden, dzięki czemu ma większą odporność na korozję wżerową i szczelinową niż stal 304.

316L jest powszechnie stosowana w instalacjach chemicznych, spożywczych, farmaceutycznych oraz w wielu instalacjach wodnych.

Nie oznacza to jednak pełnej odporności w środowiskach chlorkowych. Szczególnie pod uszczelkami, osadami i w innych ciasnych szczelinach 316L może ulegać korozji nawet wtedy, gdy odsłonięta powierzchnia wygląda prawidłowo.

904L - 1.4539

[1.4539 / AISI 904L / UNS N08904](#) jest wysokostopową stalą austenityczną zawierającą więcej niklu i molibdenu niż 316L oraz dodatek miedzi.



Zapewnia znacznie wyższą odporność korozyjną w wielu agresywnych środowiskach. Jej odporność na korozję miejscową jest wyraźnie większa niż standardowych stali 304 i 316L.

904L znajduje zastosowanie między innymi w przemyśle chemicznym, instalacjach kwasowych, urządzeniach procesowych oraz w instalacjach, w których standardowe stale nierdzewne nie zapewniają wystarczającej trwałości.

1.4529 / Alloy 926 / UNS N08926

[1.4529 / UNS N08926 / AISI 926](#), znana również jako Alloy 926, jest wysokostopową stalą superaustenityczną zawierającą około 6-7% molibdenu, dużą ilość niklu oraz dodatki azotu i miedzi.

Wysoka zawartość molibdenu i azotu zapewnia znacznie większą odporność na korozję wżerową i szczelinową niż w przypadku 316L i wielu klasycznych stali austenitycznych.

Stal 1.4529 znajduje zastosowanie między innymi w instalacjach chemicznych, systemach zawierających chlorki, instalacjach kwasu fosforowego i siarkowego, wymiennikach ciepła oraz urządzeniach pracujących w agresywnych mediach.

254 SMO - 1.4547

1.4547 / UNS S31254 / 254 SMO jest stalą superaustenityczną zawierającą około 6% molibdenu oraz podwyższoną zawartość azotu.

Jej PREN wynosi co najmniej około 42,5, dzięki czemu materiał charakteryzuje się bardzo wysoką odpornością na korozję wżerową i szczelinową.

Badania porównawcze prowadzone metodami ASTM G48 pokazują znacznie większą odporność 254 SMO na korozję szczelinową niż standardowej stali 316L, a także przewagę nad 904L w wymagających środowiskach chlorkowych.

254 SMO znajduje zastosowanie między innymi w:

- instalacjach wody morskiej,
- zakładach odsalania wody,
- wymiennikach ciepła,
- instalacjach celulozowo-papierniczych,
- instalacjach chemicznych,
- systemach oczyszczania spalin.



Duplex 2205 - 1.4462

Stal duplex 1.4462 / UNS S31803 / S32205 jest jednym z najczęściej stosowanych gatunków duplex.

Zawiera około 22% chromu, ponad 3% molibdenu oraz azot. Jej PREN wynosi około 35 lub więcej, czyli jest zdecydowanie wyższy niż w przypadku 316L.

Duplex 2205 charakteryzuje się wysoką odpornością na korozję wżerową i szczelinową oraz znacznie większą odpornością na chlorkową korozję naprężeniową niż klasyczne stale austenityczne.

Stosowany jest między innymi w instalacjach chemicznych, zbiornikach, wymiennikach ciepła, przemyśle morskim, celulozowo-papierniczym oraz w instalacjach zawierających chlorki.

Superduplex 2507 - 1.4410

1.4410 / UNS S32750 / Superduplex 2507 jest wysokostopową stalą duplex zawierającą około 25% chromu, 4% molibdenu i około 0,3% azotu.

Połączenie wysokiej zawartości chromu, molibdenu i azotu zapewnia bardzo wysoką odporność na korozję miejscową. PREN stali 2507 przekracza zwykle wartość 40.

Superduplex 2507 charakteryzuje się bardzo wysoką odpornością zarówno na korozję wżerową, jak i szczelinową, dlatego jest stosowany w szczególnie agresywnych środowiskach chlorkowych.

Typowe zastosowania obejmują:

- instalacje wody morskiej,
- offshore,
- instalacje odsalania wody,
- przemysł chemiczny,
- wymienniki ciepła,
- rurociągi i systemy procesowe zawierające chlorki.

Porównanie przykładowych gatunków

Gatunek	Oznaczenie	Odporność na korozję szczelinową
---------	------------	----------------------------------



304	1.4301	Ograniczona w środowiskach chlorkowych
316L	1.4404	Wyższa niż 304 dzięki dodatkowi molibdenu, ale nadal ograniczona w wymagających chlorkach
904L	1.4539 / UNS N08904	Znacznie wyższa niż 304 i 316L
Duplex 2205	1.4462 / UNS S32205	Wysoka odporność na korozję miejscową w chlorkach
Alloy 926	1.4529 / UNS N08926	Bardzo wysoka odporność na korozję wżerową i szczelinową
254 SMO	1.4547 / UNS S31254	Bardzo wysoka odporność, również w wodzie morskiej i agresywnych chlorkach
Superduplex 2507	1.4410 / UNS S32750	Bardzo wysoka odporność w silnie agresywnych środowiskach chlorkowych

Tabela przedstawia orientacyjne porównanie. Rzeczywista odporność zależy od temperatury, stężenia chlorków, geometrii szczeliny, pH, czasu ekspozycji, wykonania elementu i pozostałych składników medium.

Korozja szczelinowa w wodzie morskiej

Woda morska jest jednym z najbardziej typowych środowisk sprzyjających korozji szczelinowej stali nierdzewnych. Łączy wysoką zawartość chlorków z możliwością powstawania osadów i biofilmu.



Typowa stal 316L może dobrze wyglądać na otwartej powierzchni, a jednocześnie korodować pod uszczelkami, pod osadem lub w połączeniach kołnierzowych. W wymagających systemach wody morskiej stosowane są dlatego materiały o znacznie większej odporności na korozję miejscową, takie jak 254 SMO oraz stale superduplex, np. 1.4410 / 2507.

Dlaczego 316L może korodować pod uszczelką?

Jest to jeden z najbardziej praktycznych przykładów korozji szczelinowej. 316L zawiera molibden i posiada znacznie większą odporność na korozję miejscową niż 304. Jeżeli jednak roztwór zawierający chlorki dostanie się pod uszczelkę, jego wymiana z otoczeniem zostaje ograniczona.

Po zużyciu tlenu, wzroście stężenia chlorków i obniżeniu pH środowisko bezpośrednio pod uszczelką może stać się wielokrotnie bardziej agresywne niż ciecz znajdująca się kilka centymetrów dalej.

Dlatego uszkodzenie może występować dokładnie w obrysie uszczelki, podczas gdy pozostała część powierzchni stali pozostaje niemal nienaruszona.

Wpływ konstrukcji elementu

Odporność na korozję szczelinową zależy nie tylko od gatunku materiału. Bardzo duże znaczenie ma konstrukcja urządzenia.

Należy w miarę możliwości:

- eliminować ciasne szczeliny,
- unikać połączeń zakładkowych w kontakcie z agresywnym medium,
- projektować elementy umożliwiające swobodny odpływ cieczy,
- eliminować martwe przestrzenie,
- ograniczać miejsca odkładania osadów,
- stosować odpowiednio zaprojektowane uszczelnienia,
- umożliwiać skuteczne czyszczenie instalacji.

Właściwa konstrukcja może być równie ważna jak zastosowanie wyżej stopowego materiału.



Wpływ spawania i stanu powierzchni

Rzeczywista odporność elementu może różnić się od odporności prawidłowo przygotowanej próbki laboratoryjnej.

Znaczenie mają między innymi jakość spoiny, pełny przetop, skład chemiczny materiału dodatkowego, przebarwienia spawalnicze, chropowatość powierzchni oraz pozostałości po obróbce.

Niepełny przetop może sam utworzyć geometrię sprzyjającą powstawaniu korozji szczelinowej. Osady i zanieczyszczenia powierzchni dodatkowo zwiększają ryzyko.

W instalacjach ze stali nierdzewnych szczególnie istotne są więc prawidłowe spawanie, oczyszczenie powierzchni oraz – tam gdzie jest to wymagane – trawienie i przywrócenie prawidłowego stanu powierzchni pasywnej.

Jak bada się odporność na korozję szczelinową?

Jedną z najważniejszych norm stosowanych do laboratoryjnego porównywania odporności stali nierdzewnych i stopów niklu jest ASTM G48.

Norma opisuje badania wykorzystujące roztwór chlorku żelaza FeCl_3 i obejmuje zarówno badania korozji wżerowej, jak i szczelinowej.

Do badania korozji szczelinowej stosuje się specjalne elementy tworzące powtarzalną szczelinę na powierzchni próbki.

ASTM G48 obejmuje między innymi:

- **metodę B** – badanie odporności na korozję szczelinową w roztworze chlorku żelaza,
- **metodę D** – wyznaczanie krytycznej temperatury korozji szczelinowej dla stopów niklu i stopów zawierających chrom,
- **metodę F** – wyznaczanie krytycznej temperatury korozji szczelinowej stali nierdzewnych.

Badanie umożliwia przede wszystkim porównanie materiałów w ściśle określonych warunkach. Wynik ASTM G48 nie powinien być bezpośrednio utożsamiany z gwarantowaną temperaturą pracy materiału w rzeczywistej instalacji.

Jak zapobiegać korozji szczelinowej?

Najskuteczniejsza ochrona wymaga połączenia właściwego doboru materiału z odpowiednią konstrukcją instalacji.



Podstawowe działania obejmują:

- eliminowanie lub ograniczanie szczelin konstrukcyjnych,
- unikanie zastojów medium,
- regularne usuwanie osadów,
- zapewnienie możliwości czyszczenia i płukania instalacji,
- ograniczanie temperatury, jeżeli proces technologiczny na to pozwala,
- kontrolowanie zawartości chlorków,
- stosowanie materiałów o wyższej zawartości Cr, Mo i N,
- prawidłowe wykonanie i obróbkę połączeń spawanych,
- stosowanie materiałów o wyższej odporności, takich jak 1.4529, 254 SMO lub stale superduplex w najbardziej wymagających środowiskach.

Czy wyższy PREN zawsze rozwiązuje problem?

Nie. Wyższy PREN zazwyczaj oznacza większą odporność stali na korozję miejscową w środowiskach chlorkowych, ale nie jest jedynym kryterium doboru materiału. Na odporność wpływa również mikrostruktura, jakość materiału, stan powierzchni, spawanie, geometria szczeliny, temperatura oraz skład chemiczny medium. Dlatego dwóch materiałów nie powinno się porównywać wyłącznie na podstawie jednej wartości [PREN](#).

PREN jest bardzo użytecznym narzędziem do wstępnego porównania gatunków, ale końcowy dobór materiału powinien opierać się na danych korozyjnych dla rzeczywistego środowiska pracy.

Korozja szczelinowa jest lokalną formą korozji rozwijającą się w miejscach o ograniczonej wymianie medium i tlenu. Najczęściej pojawia się pod uszczelkami, osadami, podkładkami, w połączeniach kołnierзовych oraz innych wąskich przestrzeniach.

Szczególnie duże zagrożenie występuje w środowiskach chlorkowych. Wewnątrz szczeliny dochodzi do zużycia tlenu, wzrostu koncentracji chlorków i obniżenia pH, co może doprowadzić do lokalnej utraty warstwy pasywnej i gwałtownego rozwoju korozji.

Standardowe stale 304 i 316L mają ograniczoną odporność na korozję szczelinową w agresywnych środowiskach chlorkowych. Znacznie wyższą odporność oferują 904L, duplex 2205, 1.4529 / Alloy 926, 254 SMO oraz superduplex 2507.

Sam wybór bardziej stopowej stali nie zastępuje jednak prawidłowego projektowania. Eliminowanie szczelin, zastojów medium i osadów jest jednym z najskuteczniejszych sposobów ograniczenia ryzyka korozji szczelinowej.



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