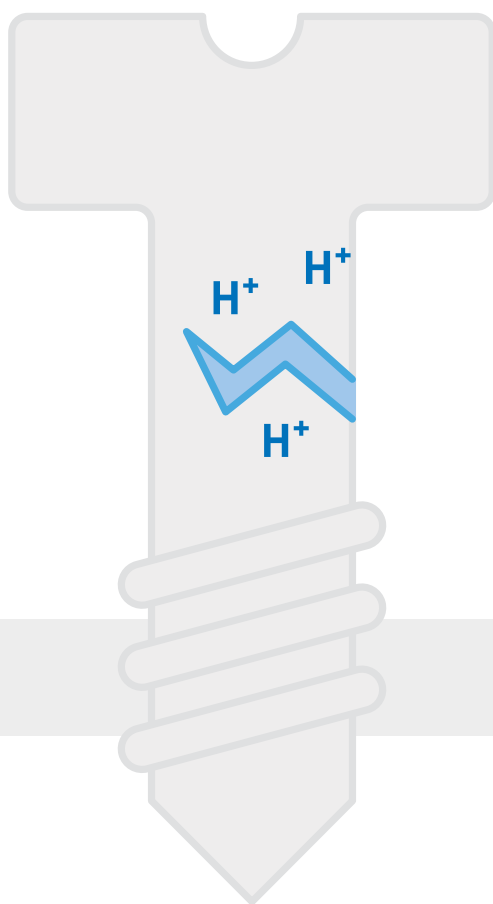




Vodíková křehkost

White Paper

Vodíková křehkost

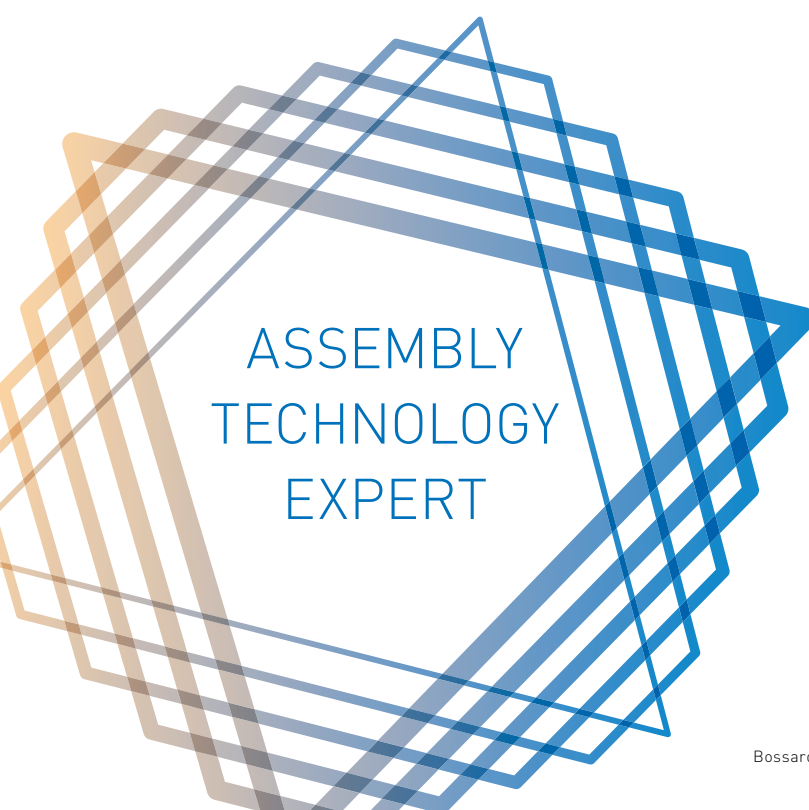
od Peter Witzke

Vedoucí Bossard Expert Team
Bossard Group

www.bossard.com

Všechna práva vyhrazena © 2025 Bossard

Uvedená doporučení a rady musí být čtenářem v praxi náležitě zváženy a pro konkrétní aplikaci musí být schváleny jako vhodné. Změny vyhrazeny.



ASSEMBLY
TECHNOLOGY
EXPERT

VODÍKOVÁ KŘEHKOST

Úvod

Jev "vodíková křehkost" je třeba brát zcela vážně, protože zde může docházet k mechanickému poškození celé řady různých konstrukčních materiálů. Přestože tato skutečnost byla poprvé zmíněna již před více než sto lety (1875) a je již mnohá desetiletí podrobena intenzivnímu výzkumu, zůstává zde ještě mnoho neznámých.

Vodíkovou křehkost je možno rozdělit do dvou kategorií. První může být zapříčiněna působením vodíku z okolního prostředí, zpravidla v důsledku koroze. Druhou kategorií je situace, kdy dochází k nasycení vodíkem v průběhu výrobního procesu. Tento případ můžeme označit jako vnitřní vodíková křehkost.

Komplexnost vzniku lomů, způsobených vodíkovou křehkostí dalece přesahuje procesy u "obvyklých" lomů a ne všechny druhy kovů a slitin jsou tím postiženy. Nejvíce ohroženy jsou oceli s vysokou pevností, jako např. slitiny s titanem a hliníkem.

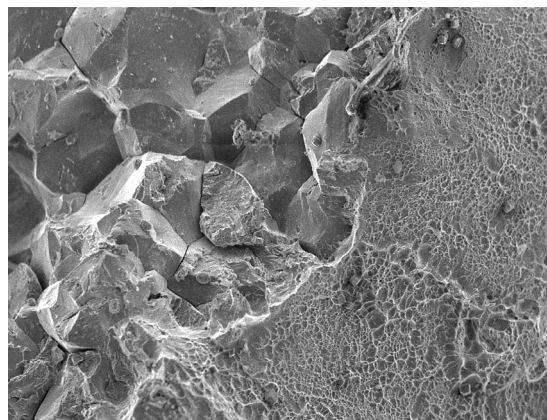
Vniknutí vodíku do kovů a slitin je důležitou příčinou pro vznik vodíkové křehkosti. Tento proces je již relativně komplexní a rovněž rychlost proniknutí vodíku závisí na četných proměnných. K příčinám proniknutí vodíku patří kromě samotné koroze i proces výroby oceli, rozklad nevhodných maziv, atmosféra při tepelném zpracování, svařování elektrickým obloukem a také zpracování ve vlhkém prostředí. Přes to všechno se zdá, že největší podíl na vzniku vodíkové křehkosti nese proces elektrolytického nanášení povrchových úprav, včetně čištění kyselinami.

VODÍKOVÁ KŘEHKOST

Základní fakta o vodíkové křehkosti

Vodíková křehkost u spojovacích materiálů se zpravidla spojuje s materiály jako je stavební ocel a legované oceli, ale jak již bylo zmíněno, mohou jí být postiženy i jiné kovy a slitiny. Tvrdost spojovacího prvku je přitom základním parametrem. Většina norem, která se zabývá jevem vodíkové křehkosti, udává riziko vzniku při tvrdosti nad 320 HV. Odborníci však nejsou jednotní a poslední studie a četné praktické příklady dokládají, že tímto prahem je až tvrdost 360 HV a od této hodnoty výše je třeba podniknout další kroky, aby se riziko vzniku vodíkové křehkosti dostalo pod kontrolu.

Selhání spojovacích materiálů vlivem vodíkové křehkosti představuje opožděný křehký lom. To znamená, že lomy vznikají pouze po montáži a jen u těch spojovacích prvků, které jsou vystaveny namáhání tahem. Méně časté případy představují některé pružné prvky, které vykazují zbytkové tažné napětí (vzniklé při tváření za studena), které mohou prasknout ještě před montáží. Velikost namáhání tahem u spojovacích materiálů je rozhodujícím parametrem, protože spojovací prvek je tím náchylnější k vodíkové křehkosti, čím vyšší je právě tahové namáhání. K lomu však může dojít i u spojovacích prvků vystavených tahovému zatížení výrazně nižšímu, než je mez pevnosti v tahu. K selhání dochází po namontování daného spojovacího prvku. Zpravidla se spojovací materiál namontuje do sestavy a již za několik hodin nebo dnů se zjistí jeho lom. Zřídka se stává, že k lomu dojde v průběhu několika sekund po montáži a maximální doba mezi montáží a selháním není zpravidla delší než několik měsíců. Pokud však k selhání dojde, stane se tak vždy náhle a bez viditelných náznaků. Defekty, které vzniknou za provozu, jsou často nákladné a někdy dokonce mají katastrofální důsledky.



Obr. 1: Smíšený lom, vpravo je tvárný a vlevo je křehký lom způsobený vodíkovou křehkostí. Otevřený zdroj: [wikimedia.org](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hydrogen_embrittlement_fracture.jpg)

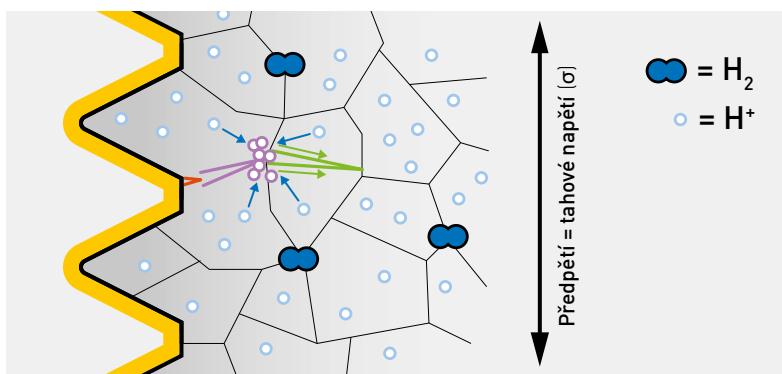
Vizuální kontrola lomu vykazuje oblast bez tažnosti, nicméně jiná část může vykazovat tažný lom vzniklý v důsledku konečného zlomení spojovacího prvku, kde zbývající plocha průřezu již nemohla odolávat zatížení. Křehký lom vykazuje velmi podobný vzhled jako mezikrystalové lomy způsobené jinými příčinami.

Pro identifikaci vodíkové křehkosti je při analýze lomu klíčové zkoumání zkušebními materiálovými inženýry pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu.

Proces vzniku a průběh vodíkové křehkosti:

1. Vniknutí vodíku do spojovacího materiálu
2. Difuze vodíku do oblastí spojovacího materiálu, který je vystaven vysokému tahovému namáhání
3. Vyloučení vodíku na hranice zrn, do vměstků a jiných záchytných míst
4. Dosažení kritické koncentrace vodíku
5. Postupný vznik lomu

Body 2 až 5 přetrvávají tak dlouho, dokud spojovací materiál přestane odolávat zatížení a praskne.



Obr. 2: Vývoj lomu u spojovacího prvku

VODÍKOVÁ KŘEHKOST

Vniknutí vodíku do spojovacího materiálu

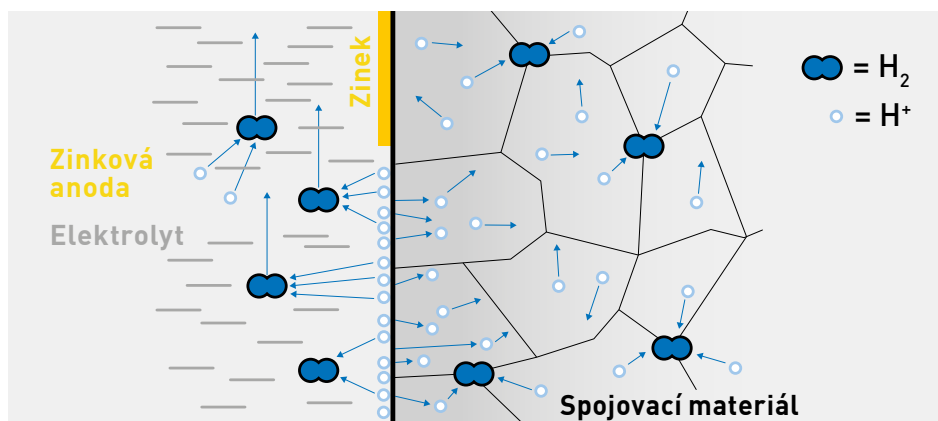
Jak již bylo zmíněno, vodík může pocházet z různých zdrojů. Pokud se však bavíme o škodách vzniklých v důsledku vodíkové křehkosti, bývá to v naprosté většině spojeno s výrobními procesy, při nichž dochází ke styku materiálu s kyselinami a k následnému elektrolytickému povlakování.

Elektrolyty, které se používají při nanášení povrchových úprav, se v posledních letech z důvodů nárůstu efektivity optimalizovaly a zároveň se v nich i snížil podíl vodíku. Neexistuje ale žádná záruka, že tato optimalizace stoprocentně zabráni riziku vzniku vodíkové křehkosti.

Předtím, než se provede elektrolytické povlakování, vyžadují spojovací materiály aktivní povrch a proto musí být chemicky naprosto čisté. Proces čištění se zpravidla skládá z alkalického odmaštění a následného čištění kyselinou za účelem odstranění usazenin, rzi a oxidů, které vznikly při tepelném zpracování. Součástí s vysokou pevností je třeba alkalicky nebo mechanicky očistit, přestože se přitom jedná o pomalé a nákladné procesy.

V důsledku čištění kyselinou vzniká značné množství atomů vodíku (H), které se vytvářejí na povrchu spojovacího materiálu. Doba ponoření závisí na stavu povrchu při zpracování a měla by být co možná nejkratší. Přitom je vždy třeba použít inhibitory. Některé atomy vodíku se spojují do molekul H_2 , které jsou patrné jako bubliny v kyselině. Část vodíku se však absorbuje do oceli. Výsledné množství, které absorbuje spojovací materiál, závisí na době čištění kyselinou a na složení kyseliny.

Následně se provede elektrolytické povlakování. Při něm se materiály tvořící povrchovou úpravu (např. Zn, Ni nebo Cr) usazují na spojovacím materiálu ve formě ionů v důsledku katodické reakce v elektrolytu. I při těchto procesech může vznikat vodík, který může být absorbován spojovacím materiálem. Norma ISO 4042 „Elektrolytické povlaky pro spojovací materiály“ představuje v tomto vztahu referenční standard a poskytuje pokyny pro zabránění vzniku jevu vodíkové křehkosti.



Obr. 3: Proces elektrolytického povlakování

VODÍKOVÁ KŘEHKOST

Difuze vodíku do oblastí spojovacího prvku, který je vystaven vysokému namáhání tahem

Vodík se rozkládá v ocelových spojovacích materiálech na atomární vodík (H). Absorbované atomy vodíku jsou velice pohyblivé a dokáží difundovat do materiálu spojovacího materiálu. Spojovací materiál má tendenci koncentrovat atomy vodíku do oblastí s vysokým tahovým namáháním a v

průběhem času se tak zvyšuje jejich koncentrace právě v těchto oblastech. Pokud dojde ke spojení dvou sousedních atomů, vytvoří se v tomto místě molekula vodíku (H₂). Tato molekula již výrazně větší v porovnání s atomem a zůstává „zafixována“ na místě.

Vyloučení vodíku na hranice zrn, do vměstků a jiných míst

Jak již bylo řečeno dříve, mají lomy vzniklé vodíkovou křehkostí charakter mezikrystalické povahy. Ve vnitřní části spojovacího materiálu má vodík tendenci shlukovat se na hranicích zrn, vměstcích

a jiných „záchytných“ místech. Zatímco vodík postupně difunduje do spojovacího materiálu, zvyšuje se jeho vylučování na těchto záchytných místech.

Dosažení kritické koncentrace vodíku

Při vyšších koncentracích vodíku dochází k selhání již při malých kritických napětích a při malých koncentracích vodíku dochází k selhání, až když se dosáhne vyšších kritických napětí. Pohyblivé atomy vodíku se vylučují směrem k vadám na povrchu a dalším místům s vysokým namáháním v tahu, což vede k tomu, že se tyto oblasti zeslabí. Když kombinace sestávající z koncentrace vodíku a napětí

dosáhne kritického bodu, dojde k výskytu lomu. Tento proces může pokračovat a nakonec vede k tomu, že spojovací materiál praskne. Původní trhlinka se vyskytuje zpravidla uvnitř jednoho zrna a odsud se rozšiřuje, až dosáhne hranice jádra. Odsud postupuje podél hranice zrna, až dojde k definitivní destrukci spojovacího materiálu.

VODÍKOVÁ KŘEHKOST

Prevence před absorpcí vodíku a odstraňování vodíku

Vodíková křehkost je nanejvýš nepředvídatelná a všechno úsilí k jejímu zamezení je třeba zohlednit jak při plánování, v rámci něhož se definují parametry výrobku, tak i při následné výrobě. V důsledku nepoužívání technologií, při nichž dochází ke vzniku vodíku a jeho následné absorpci do spojovacího materiálu, je riziko vzniku vodíkové křehkosti eliminováno. Vodíkovou křehkost, která vzniká působením koroze, lze eliminovat začleněním vhodné povrchové úpravy, u níž během procesu nanášení nedochází k tvorbě vodíku.

V následující části uvádíme výběr možných řešení:

- Mechanické pozinkování
- Dacromet
- Geomet
- Delta Protekt
- Xylan 1014/1400/1424
- Magni 565

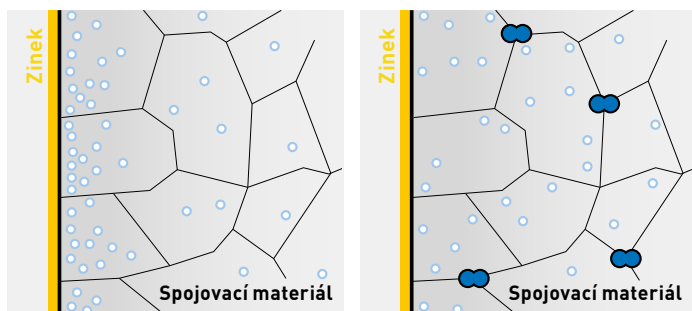
Vodíková křehkost se týká jen spojovacích materiálů s vysokou pevností. Pokud to umožní daná aplikace a pokud vznik vodíku při výrobě spojovacího prvku nelze vyloučit, potom je třeba použít spojovací prvky s tvrdostí nižší než 320 HV (resp. 360 HV).

Pokud je to možné, je vhodné eliminovat používání kyselin k čištění. V případě, že to není možné, pak co nejvíce zkrátit čas potřebný na moření. Mořidlo by mělo vždy obsahovat inhibitory. V případech, kdy je třeba použít spojovací materiály vysoké pevnosti, při jejichž výrobě nelze zcela vyloučit vznik vodíku a jeho absorpci do materiálu spojovacího prvku, je zásadní toto riziko minimalizovat tím, že se následně provede tepelné zpracování označované jako „odvodňování“.

Dle ISO 4042 je teplota tohoto procesu cca. 200°C až 230°C a jeho trvání 2 až 24 hodin. Díly musí být do čtyř hodin po elektrolytickém povlakování vyžehány (ještě lépe do jedné hodiny, protože koncentrace vodíku je bezprostředně po čištění kyselinou a po elektrolytickém povlakování přímo pod povrchem oceli dosud stále vysoká). Přitom je třeba se zmínit, že zachování příslušných teplot závisí na teplotě jádra spojovacího materiálu.

Především u spojovacích materiálů se zbytkovým napětím je doba pro „odvodňování“ velmi důležitá. Zbytková napětí ve spojovacích materiálech způsobují, že vodík, který se nachází poblíž povrchu, se vylučuje do oblastí kde je pnutí, nebo které jsou postiženy vadami povrchu (vměstky, usazeniny, apod.), což opět může vést k vodíkové křehkosti.

Účel odvodňování spočívá v tom, aby se co nejvíce vodíku vypudilo a zbytek se rozptýlil napříč spojovacím materiálem. Tím se snižuje množství pohyblivého vodíku, který způsobuje křehnutí. Studie poukazují na to, že doba tepelného zpracování má rozhodující význam. Pokud se jeho doba blíží 24 hodinám, tím lépe. Tepelná zpracování za 5 – 6 hodin dosáhla naproti tomu jen velice malého účinku.



Obr. 4: Rozložení vodíku před (vlevo) a po „odvodňování“ (vpravo)

VODÍKOVÁ KŘEHKOST

Postup při analýze vodíkové křehkosti u spojovacích materiálů

Pokud dojde k závadám vlivem vodíkové křehkosti, pak jimi jsou jen zřídka postiženy všechny spojovací prvky jedné dávky. Ve skutečnosti je tomu tak, že jen velmi malý podíl spojovacích materiálů vykazuje postižení vodíkovou křehkostí, pokud jsou vystaveny namáhání v tahu. Kontrola je samozřejmě možná, avšak ani značný počet zkoušek nedokáže při daných podmínkách identifikovat postižené prvky, a to i když samotné zkušební metody jsou vysoce efektivní.

Způsob kontroly spojovacích materiálů je dán normou ISO 15330 „Spojovací prvky - Zátěžová zkouška pro zjištění vodíkové křehkosti - Metoda rovnoběžné opěrné plochy“. Při tomto pokusu je spojovací materiál vystaven namáhání v tahu až do meze kluzu, příp. kritickému krouticímu momentu. Namáhání příp. napětí se udržuje po dobu minimálně 48 hodin. Pro pokus je nezbytné, aby spojovací materiál byl vystaven konstantnímu namáhání v tahu a sesedávání bylo omezeno na minimum. Po 24 hodinách se spojovací materiál opětovně zatíží a současně se kontroluje, zda došlo k nějaké závadě v důsledku vodíkové křehkosti.

Pokud všechny spojovací prvky jedné dávky v tomto pokusu obstály bez lomu, nebo viditelných trhlin, je možno tuto dávku uvolnit. Přitom je však třeba vědět, že tyto pokusy jsou určeny jako dílčí zkoušky při výrobě, protože se provádějí v rámci několika hodin po výrobních procesech, při nichž může docházet ke vzniku vodíku. Jak již bylo popsáno výše, je krátká doba od proniknutí vodíku kriticky důležitá pro provedení nápravných opatření. Totéž platí pro efektivitu pokusů týkajících se vodíkové křehkosti. Pro výstupní kontrolu spojovacích materiálů je nejlepším možným řešením použití popsané zkušební metody podle normy ISO 15330. Přesto však je třeba upozornit na to, že šance na rozpoznání potenciálních závad je relativně malá.



Pokud potřebujete více informací, navštivte prosím
naše stránky www.bossard.com/cs a kontaktujte
vaši nejbližší obchodní jednotku.