



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

**Vliv vodíkové křehkosti na mechanické
vlastnosti konvenční předpínací výztuže**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR: Bc. Tomáš Chobotský

VEDOUcí PRÁCE: Ing. Jiří Kuchař, Ph.D., IWE

STUDIJNÍ PROGRAM: N0715A270001 Výrobní inženýrství

PRAHA 17.8. 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Chobotský Jméno: Tomáš Osobní číslo: 484735
Fakulta/ústav: Fakulta strojní
Zadávací katedra/ústav: Ústav strojírenské technologie
Studijní program: Výrobní inženýrství
Specializace: Bez specializace

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vliv vodíkové křehkosti na mechanické vlastnosti konvenční předpínací výztuže

Název diplomové práce anglicky:

Influence of hydrogen embrittlement on mechanical properties of conventional prestressing reinforcement

Pokyny pro vypracování:

1. Rozbor problematiky vodíkové křehkosti a jejího vlivu na materiál
2. Zhotovení vzorků
3. Vyhodnocení a diskuze výsledků

Seznam doporučené literatury:

Yukitaka Murakami, 21 - Hydrogen embrittlement, Editor(s): Yukitaka Murakami, Metal Fatigue (Second Edition), Academic Press, 2019, Pages 567-607, ISBN 9780128138762, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813876-2.00021-2>.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jiří Kuchař, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Ing. Petr Pokorný, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 26.04.2023

Termín odevzdání diplomové práce: 18.08.2023

Platnost zadání diplomové práce: 31.12.2023

Ing. Jiří Kuchař, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jiřího Kuchaře, Ph.D., IWE, a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

Podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

První poděkování bych chtěl věnovat vedoucímu mé diplomové práce, Ing. Jiřímu Kuchařovi, Ph.D., IWE za profesionální vedení. Druhý neméně důležitý dík patří Ing. Petrovi Pokornému, Ph.D. za veškerý čas, trpělivost, invenci, znalost, a hlavně lásku k vědě a zkoumání, kterou ve mě dozajista vzbudil. O to krásnější je fakt, že tato práce vyústila v naše přátelství a budu moc rád, když mě ještě provedete dalšími podobně obohacujícími projekty a zkoumáním.

Samozřejmě nesmím zapomenout na pana Ing. Jana Hlaváčka, Ph.D., který z pozice zaměstnance katedry elektroenergetiky FEL ČVUT zaštiloval diplomovou práci po elektrotechnické stránce a velmi ochotně, skromně a inženýrsky řešil každý problém, který se v průběhu experimentu vyskytl a za to mu patří můj velký dík a obdiv.

S dalším díkem se chci obrátit na prof. Ing. Jiřího Kolíska, Ph.D., který motivoval vznik této diplomové práce a za možnost být součástí Kloknerova ústavu pod jeho vedením a využívat profesionálního zázemí výzkumného a zkušebního pracoviště.

Bezesporu největší dík chci věnovat svým rodičům, kteří mě po celých pět let mých studií v Praze bezmezně podporovali, jak materiálně, tak psychicky. Děkuji Vám za cit a talent pro techniku, který jsem zdědil bezesporu po Vás.

Poslední dík patří mým bratrům, Jakubovi a Davidovi za to, že mi ukázali cestu a za to, že jsou.

Anotace

Název diplomové práce:

Vliv vodíkové křehkosti na mechanické vlastnosti konvenční předpínací výztuže

Autor práce: Bc. Tomáš Chobotský

Vedoucí práce: Ing. Jiří Kuchař Ph.D., IWE

Konzultant: Ing. Petr Pokorný Ph.D.

Akademický rok: 2022-2023

Vysoká škola: ČVUT v Praze, Fakulta strojní

Ústav: 12133 – Ústav strojírenské technologie

Vedoucí ústavu: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

Rozsah práce: 90 stránek, 9 tabulek, 71 obrázků

Klíčová slova: vodíková křehkost, atomární vodík, předpínací výztuž, tahová zkouška, beton, konstrukce, metalografie, difuze

Annotation

Title of the final thesis: Impact of hydrogen embrittlement on mechanical properties of prestressing reinforcement

Author: Bc. Tomáš Chobotský

Supervisor: Ing. Jiří Kuchař, Ph.D., IWE

Consultant: doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.

Academic year: 2022-2023

University: CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering

Department: 12133 – Department of Manufacturing Technology

Head of department: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

Extent: 90 pages, 9 tables, 71 pictures

Keyword: hydrogen embrittlement, active hydrogen, prestressing reinforcement, tensile testing, concrete, construction, metallography, diffusion

Seznam použitých zkratek a symbolů

H	vodík
H _{abs}	absorbovaný vodík
H _{ads}	adsorbovaný vodík
Cu	měď
Cr	chrom
Ni	nikl
O	kyslík
Fe	železo
Mn	mangan
Ti	titan
Al	hliník
Mg	hořčík
C	uhlík
Si	křemík
K	draslík
S	síra
P	fosfor
N	dusík
Na	sodík
Zr	zirkonium
Ta	tantal
Pb	olovo
e ⁻	elektron
pH	vodíkový exponent
BCC	kubická prostorově středěná krystalická mřížka
FCC	kubická plošně středěná krystalická mřížka
Na ₂ SO ₄	síran Sodný

CH ₄	methan
MnS	sulfid manganatý
HCl	kyselina chlorovodíková
Fe ₂ (SO ₄) ₃	síran železitý
Fe ₃ C	karbid železa, cementit
°C	stupeň Celsia
Pa	pascal
N	newton
MPa	megapascal
kN	kilonewton
A	tažnost
A _{gt}	prodloužení při přetržení
R _m	mez pevnosti
R _e	mez kluzu
R _{p0,2}	smluvní mez kluzu
σ	napětí
E	modul pružnosti
g	gram
m	metr
cm	centimetr
μm	mikrometr, mikron
pm	pikometr
mm	milimetr
mm ²	milimetr čtvereční
l	litr
d	délka
Ø	průměr
R	rádus, poloměr
W	watt
K	kelvin

V	volt
A	ampér
Ω	ohm
R	elektrický odpor
S	siemens
J	proudová hustota
m	hmotnost
S	plocha
HE	vodíková křehkost
Hz	hertz
f	frekvence
DC	stejnoseměrný proud
AC	střídavý proud
t	čas
ρ	hustota
s	sekunda
min	minuta
h	hodina
sin	sinus
cos	kosinus
α	ferit alfa
γ	austenit
R	molární plynová konstanta
E_{kor}	korozní potenciál
f_{ck}	válcová pevnost betonu v tlaku
$f_{ck, cube}$	krychelná pevnost betonu v tlaku
f_{ctm}	pevnost betonu v tahu
ppm	parts per milion, miliontina
HEI	index vodíkové křehkosti
δ_0	mechanické vlastnosti před sycením vodíkem

δ_H	mechanické vlastnosti po sycení vodíkem
c	koncentrace
D	difuzní koeficient
J	hustota difuzního toku
HPT	hydrogen pressure theory, vodíková tlaková teorie
HEDE	hydrogen-enhanced decohesion, vodíkem zesílená dekoheze
HELP	hydrogen-enhanced localised plasticity, lokalizovaná plasticita zesílená vodíkem
HIPT	hydrogen-induced phase transformation, vodíkem indukovaná fázová transformace
SEM	skenovací elektronový mikroskop

Obsah

1	ÚVOD	13
2	TEORETICKÁ ČÁST	15
2.1	Vodíková křehkost	15
2.1.1.	Vodíková koroze	17
2.1.2.	Zdroje a vznik vodíku	17
2.1.3.	Mechanismy vstupu vodíku do struktury	21
2.1.3.1.	Vstup z vodné fáze	21
2.1.3.2.	Vstup z plynné fáze	22
2.1.4.	Mechanismy vzniku vodíkové křehkosti	23
2.1.4.1.	HPT - Vodíková tlaková teorie	23
2.1.4.2.	HEDE – Vodíkem zesílená dekoheze	24
2.1.4.3.	HELP – Lokalizovaná plasticita zesílená vodíkem	24
2.1.4.4.	HIPT – Vodíkem indukovaná fázová transformace	25
2.1.4.5.	HESIV – Indukce vakancí zesílená vodíkem	26
2.1.5.	Difuze vodíku	26
2.1.6.	Problematika vodíkových pastí	27
2.1.7.	Eliminace vodíkové křehkosti	28
2.2.	Předpjaté betonové konstrukce	29
2.2.1.	Historie předpjatého betonu	30
2.2.2.	Podstata předpjatého betonu	31
2.2.3.	Koroze předpínací výztuže	32
2.3.	Základy teorie lomů	34
2.3.1.	Tvárný lom	35
2.3.2.	Křehký lom	35
2.3.3.	Další dělení lomů	36
3	PRAKTICKÁ ČÁST	38
3.1.	Cíle praktické části	38
3.2.	Specifikace zkušebních vzorků předpínací výztuže	39
3.3.	Příprava vzorků	41
3.4.	Konvence galvanického zapojení	42
3.5.	Elektrochemická podstata experimentu	44

3.6.	Expozice vzorků	47
3.6.1.	Průběh expozice	47
3.7.	Zkouška tahem.....	49
3.7.1.	Instrumentace trhacího zařízení	50
3.7.2.	Průběh zkoušky tahem	52
3.7.3.	Metoda vyhodnocení	52
3.8.	Výsledky zkoušky tahem.....	53
3.8.1.	Referenční skupina	54
3.8.2.	Skupina A	56
3.8.3.	Skupina B	58
3.8.4.	Skupina C	60
3.8.5.	Skupina D.....	62
3.9.	Metalografická analýza vzorků	63
3.9.1.	Referenční skupina bez zkoušky tahem	64
3.9.2.	Referenční skupina po zkoušce tahem	65
3.9.3.	Skupina A.....	66
3.9.4.	Skupina B	66
3.9.5.	Skupina C a D	67
3.10.	Analýza lomových ploch	68
3.10.1.	Referenční skupina	68
3.10.2.	Skupina A	71
3.10.3.	Skupina B	73
3.10.4.	Skupina C	75
3.10.5.	Skupina D	76
4	Závěr	79
5	Citovaná literatura.....	83
	Seznam tabulek	87
	Seznam obrázků	88

1 ÚVOD

Fenomén vodíkové křehkosti je znám už od minulého století a tvoří nepřehlédnutelný problém u materiálu s vysokou pevností jako mohou být právě předpínací výztuže betonových konstrukcí. Křehnutí ocelových materiálů se doposud zkoumalo zejména na běžně využívaných konstrukčních dílech a spojovacím materiálu např. šroubech, pojistných kroužcích nebo jiných vysokopevných součástech. Velmi důležité je uvědomění, že k selhání materiálu dochází až se zpožděním. Důležitými proměnnými pro kontaminaci struktury vodíkem jsou výrobní procesy, doba expozice vodíku nebo velikost zatížení součásti. V posledních letech se začínají čím dál, tím více využívat vysokopevné oceli zejména v automobilovém průmyslu a zde se věnuje velká pozornost fenoménu vodíkové křehkosti. Podstatou vodíkové křehkosti je difuze vodíku pouze v atomární podobě H, která následně snižuje mechanické vlastnosti materiálu. Teorií o tom, co se ve struktuře děje je více. Jednou z těch nejpoužívanějších je teorie, která říká, že se dva atomární vodíky ve struktuře rekombinují ve stabilní molekulu H₂ za zvětšení objemu a vzniku vnitřního pnutí uvnitř materiálu, který ho v podstatě roztrhá zevnitř. Důležité je říci, že je tato teorie nejrozšířenější, ale neznamená to, že je nejvíce nakloněná důkazům a pravdě.

Pokud máme mluvit o předpínací výztuži, je nutno říci, že se jedná o konstrukční prvek dosahující hodnot na mezi pevnosti kolem 1 900 MPa (a mezi kluzu kolem 1 640 MPa), tedy velmi pevný ocelový materiál, který by měl být podle výše zmíněných teorií velmi náchylný k vodíkovému křehnutí. Jedná se o tažené ocelové lano spletené ze sedmi drátů, které má za úkol spínat všechny segmenty konstrukce a vytvořit předpětí, protože beton má sám o sobě skvělé pevnosti v tlaku, ale nedostatečné v tahu. Předpínací lano je esenciálním nosným prvkem mostních konstrukcí. Kdyby se předpínací lana přetrhala, došlo by ke kritickému snížení únosnosti konstrukce, která by mohla vést ke zřícení. Nejznámějším příkladem předepnuté konstrukce v České republice je bezesporu pražský Nuselský most, který spojuje městské části Karlova a Pankráce přes Nuselské údolí. Most je ve výšce téměř 43 metrů a má délku 485 metrů, což je na betonovou konstrukci opravdu významné rozpětí. I přesto se v dnešní době i většina menších železničních

a silničních mostů řeší předepínáním. Po celé Republice je nespočet mostů a lávek z předpjatého betonu.

Nutno podotknout, že motivací vzniku teorie vodíkové křehkosti na předpínacích výztužích, je nejisté vysvětlení příčin zborcení několika mostních konstrukcí v Evropě. Pád konstrukce je většinou souhrou více nepříznivých faktorů a je možné, že vodíková křehkost může být jedním z nich.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Vodíková křehkost

Jako vodíková křehkost HE (Hydrogen Embrittlement) se v dnešní době rozumí nežádoucí samovolná difuze atomárního vodíku do krystalické mřížky kovového materiálu. Tato difuze spolu s následnými mechanismy vodíkové křehkosti, spolu s dalšími typy poškození způsobené vodíkem uvnitř materiálu, zapříčiňují pokles mechanických vlastností například meze pevnosti, tažnosti nebo modulu pružnosti. V běžných podmínkách bez zvýšeného tlaku a teploty může docházet k difuzi vodíku do materiálu, ale nemůže docházet k reakcím s jinými prvky v rámci struktury. Díky svým velmi malým rozměrům dokáže vodík difundovat uvnitř struktury a následně se hromadit například na hranicích zrn nebo v takzvaných vodíkových pastech, o kterých bude řeč v následujících kapitolách. Již při velmi nízkých koncentracích je vodík schopen iniciovat růst trhlin i jinak ovlivňovat materiál například z hlediska tažnosti. Při nahromadění rekombinovaného vodíku v okolí hranic zrn nebo poruch materiálu dochází k postupnému křehnutí a praskání. [1][2][8]



Obrázek 1: Lom způsobený vodíkovou křehkostí [33]

Jak bylo již zmíněno v úvodu, existují materiály, které jsou k vodíkové křehkosti náchylnější, což jsou zejména konstrukční oceli s vyššími pevnostními vlastnostmi, ocele s vyšším obsahem manganu, ale i některé hliníkové a hořčíkové slitiny. Index vodíkové křehkosti HEI je hlavním ukazatelem náchylnosti materiálu k vodíkové křehkosti, který se počítá podle jednoduchého vzorce:

$$HEI = \frac{\delta_0 - \delta_H}{\delta_0} \quad (1)$$

,kde δ_0 jsou mechanické vlastnosti materiálu před sycením vodíkem a δ_H jsou mechanické vlastnosti po sycení vodíkem. [2][4]

Velmi znatelný je zejména pokles tažnosti. Pokud se jedná o vysokopevnostní martenzitické oceli s mezí kluzu nad 1 400 MPa, pohybuje se kritické množství vodíku v řádech desetin ppm. Pro změnu mechanických vlastností oceli s feritickou strukturou a mezí kluzu vyšší než 750 MPa je kritické množství znatelně vyšší, kolem 10 ppm. Aby došlo k významnému vodíkovému křehnutí musí být splněny základní faktory:

- Musí být znatelná náchylnost k vodíkovému křehnutí daného materiálu
- Ve struktuře musí být obsaženo nadkritické množství vodíku
- Musí se jednat o materiál s vysokými hodnotami meze pevnosti
- Napětí působící na materiál musí být dostatečně velké a kontinuální

Pokud se jedná o tzv. vratné vodíkové křehnutí, dochází k obnovení mechanických vlastností po úniku vodíku ven ze struktury. Naopak u nevratného mechanismu dochází k degradaci, která je trvalá.

V bodech níže jsou shrnuty elementární poznatky a základní pravidla, které jsou platné pro vodíkové křehnutí. Jedná se o základní znalosti, které jsou důležité pro pochopení mechanismů celé problematiky. [1][4][9][10]

- Zásadní vliv na vodíkové křehnutí má atomární vodík, nikoliv molekuly vodíku H_2
- Čím vyšší má materiál pevnost, tím vyšší je náchylnost k vodíkovému křehnutí
- Vyšší náchylnost mají také materiály s kubickou prostorově středěnou mřížkou BCC (α -ferit) než materiály s kubickou plošně středěnou mřížkou FCC (austenit, hliník)
- Difuze vodíku do struktury je vratný proces, pokud vodík unikne ven ještě před porušením materiálu

- Vodíkové křehnutí je způsobeno atomy difuzibilního vodíku, které jsou přitahovány polem vznikajících trhlin
- Může docházet ke změnám lomového mechanismu z důvodu hromadění atomů vodíku na špičce trhlin
- Vysoké rychlosti zatěžování omezují vnik vodíku do trhlin a tím snižují vliv vodíkového křehnutí [1][3][9]

2.1.1. Vodíková koroze

Dalším jevem úzce spjatým s difuzí vodíku do struktury je takzvaná vodíková koroze. Vodíková koroze nastává pouze při vysokých teplotách, protože jde o jev, při kterém je vodík schopen rozkládat karbidy, např. Fe_3C , který je nositelem tvrdosti a pevnosti v oceli. U zmíněného karbidu železa probíhá rozklad podle rovnice níže (2).



Karbid železa spolu s vodíkovou molekulou H_2 vytváří atomové železo a methan. Případně může vodík reagovat se samostatným uhlíkem ve struktuře litin (3).



Následkem reakcí vzniká methan, který je uvězněn ve struktuře a není schopen další difuze. Poté se methan hromadí po hranicích zrn, v dutinách nebo vměstcích, kde vyvolává velké vnitřní pnutí. V konečném důsledku může dojít k iniciaci trhlin a lomu. [1][3][8]

2.1.2. Zdroje a vznik vodíku

Nejjednodušším prvkem periodické tabulky prvků a našeho světa je vodík, latinsky nazývaný hydrogenium. Jeden atom vodíku obsahuje pouze jeden proton a elektron, v přírodě se většinou nachází izotop, který má navíc ještě jeden neutron. Jeho teplota tání je kolem 14 K a teplota varu kolem 20 K, tudíž se s ním za normálních podmínek setkáváme jako s plynnou látkou, která nemá žádnou barvu, ani zápach. Je hořlavý a hoří modrým plamenem. V přirozených podmínkách se vyskytuje ve dvouatomových molekulách H_2 , které tvoří jednoduchou kovalentní σ vazbu. Tato molekula samovolně disociuje až kolem teploty 2 700 °C. Důležitou vlastností, kterou lidstvo využívalo, je jeho hmotnost. Vodík je 14x lehčí než vzduch,

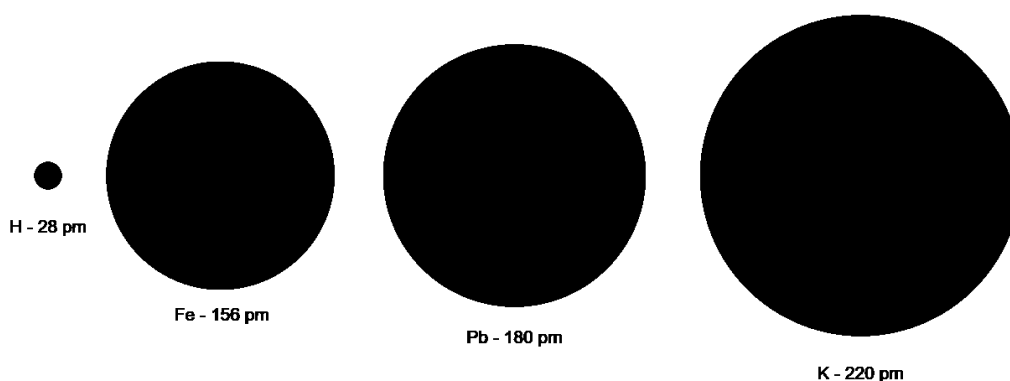
což například umožňovalo plnění vzducholodí tímto plynem na úkor bezpečnosti cestujících. [1][2][13]



Obrázek 2: Hořící vzducholod' LZ 129 Hindenburg naplněná vodíkem [36]

V souvislosti s kovy, konkrétně železem, je nutné si uvědomit, že atomový poloměr atomárního vodíku je pouhých 28 pm, což je násobně méně než poloměr železa (156 pm), draslíku (220 pm) nebo olova (180 pm). Z tohoto důvodu je umožněn vstup a difuze jednotlivých atomů vodíku do krystalických mřížek kovů. [2][3]

Většina přechodných prvků s vodíkem tvoří buď intersticiální tuhý roztok, nebo kovalentní hydrid s omezenou rozpustností. Tuhé roztoky vznikají s mědí, chromem, železem, niklem nebo kobaltem. [3][6][9]



Obrázek 3: Srovnání atomových poloměrů

Jako zdroje vodíku, které jsou příčinou vnitřní vodíkové křehkosti mohou být technologie povrchových úprav a předúprav, zejména moření v kyselině chlorovodíkové a sírové, svařování, kde je možné vodík do struktury vnést pomocí vlhké elektrody nebo technologie tepelného zpracování. [8][12][46]

O tom, jak velké množství vodíku bude do struktury vneseno rozhoduje mnoho faktorů, kterými jsou například volba použitého materiálu a surovin, způsobu a délce provedení výrobního procesu nebo volba pecní atmosféry a režim tepelného zpracování. Zda se vodík do struktury při operacích dostal není nejprve jasně patrné. V extrémních případech jsou k vidění pouze puchýře nebo miniaturní trhliny. [1]

Jak bylo zmíněno výše, pokud se jedná o vnášení vodíku do struktury kovu při svařování, mají největší vliv všechny faktory, které vnášejí vlhkost do svařovacího prostředí. Může se jednat o nedokonale vysušené elektrody nebo vlhkost v tavidlech. Pokud je do struktury vodík vnesen, projevuje se vodíková křehkost po ochlazení svaru menšími trhlínami. [4][9][46]



Obrázek 4: Vodíková trhlina ve svarovém spoji [32]

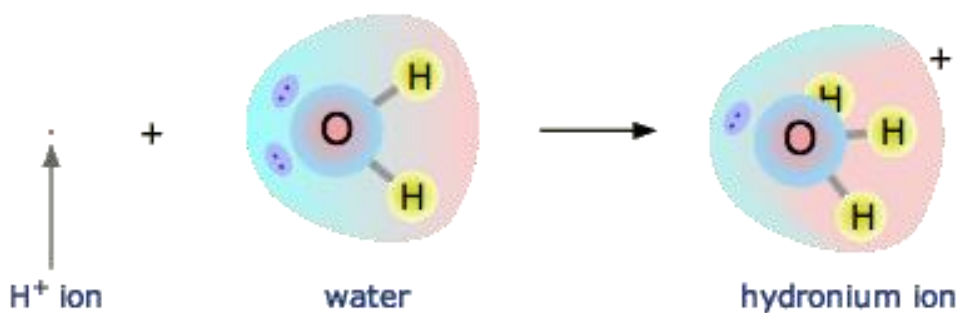
Pokud se jedná o zdroje vodíku na předpínacích lanech, jsou úvahy o dost složitější. Vzhledem k tomu, že by mělo být ocelové předpínací lano v celém objemu zainjektováno injektážní maltou, v praxi tomu tak často není. Je známo mnoho případů, kdy se injektážní malta, která se do chráničky vstříkuje z různých míst pomocí injektážních trubiček, nedostala do celého prostoru kolem předpínací

výztuže. Postupem času se do těchto míst dostane voda z okolního prostředí, která v první řadě způsobuje korozi výztuže, ale v druhé řadě je také možné, že zapříčiňuje vodíkové křehnutí, jestliže není přítomen kyslík. [34][35]



Obrázek 5: Koroze vedoucí k lomu předpínacích drátů [foto autora]

V rámci vodných roztoků jsou mimo neutrálních molekul vody, přítomné i takzvané oxoniové ionty H_3O^+ , které jsou nazývány také jako hydronium. Tyto ionty vznikají navázáním atomárního vodíku H^+ na stabilní molekulu vody H_2O pomocí koordinačně kovalentní vazby. Vznik kationtu je vratný proces, který dosahuje rovnováhy v systému. Recipročně se je schopen tento oxoniový iont, rozdělit na molekulu vody a uvolnit tím jeden atomární vodík, který už je schopen proniknout do struktury oceli. [1][7] [11]



Obrázek 6: Hydronium [37]

2.1.3. Mechanismy vstupu vodíku do struktury

Vzhledem k násobně větší velikosti molekulární vodíku H_2 není vodík schopen v této formě do struktury vstoupit. Vodíková molekula má jeden plně obsazený a druhý prázdný molekulový orbital, tudíž je relativně stabilní. Do struktury kovových materiálů je tedy schopen vodík vstoupit pouze v atomární podobě, kde je jeho velikost násobně menší. [1] [2]

2.1.3.1. Vstup z vodné fáze

Prvním z dvojice mechanismů vstupu, je vstup z vodné fáze, který je opodstatněn disociací molekul vodíku, hydratací protonu nebo molekul vody.

Chemicky lze disociaci H_2 popsat pomocí níže uvedených rovnic. Molekula vodíku v plynné formě (g) se rozpustí v roztoku (aq). Následně rozpuštěná molekula disociuje a adsorbuje na povrch kovu. [1][5][46]



Adsorbovaný atom pak může vstoupit do struktury a tím se stát absorbovaným atomem.



Druhou možnou cestou z vodné fáze je elektrochemická redukce vodíku, která se řídí Volmer-Heyrovského reakcemi. Podle Volmerových reakcí se v kyselém prostředí redukuje vodíkový ion.



V neutrálních a zásaditých prostředích se naopak redukuje molekula vody.

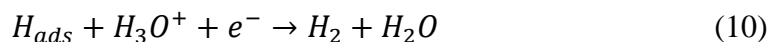


Dále se adsorbované atomy vodíku rekombinují v molekulu podle Tafelovy nebo Heyrovského desorpční reakce.

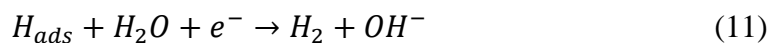
Tafelova reakce bere v potaz rekombinaci dvou adsorbovaných vodíkových atomů.



Podle Heyrovského reakce v kyselém prostředí probíhá rekombinace viz. rovnice č. 10.

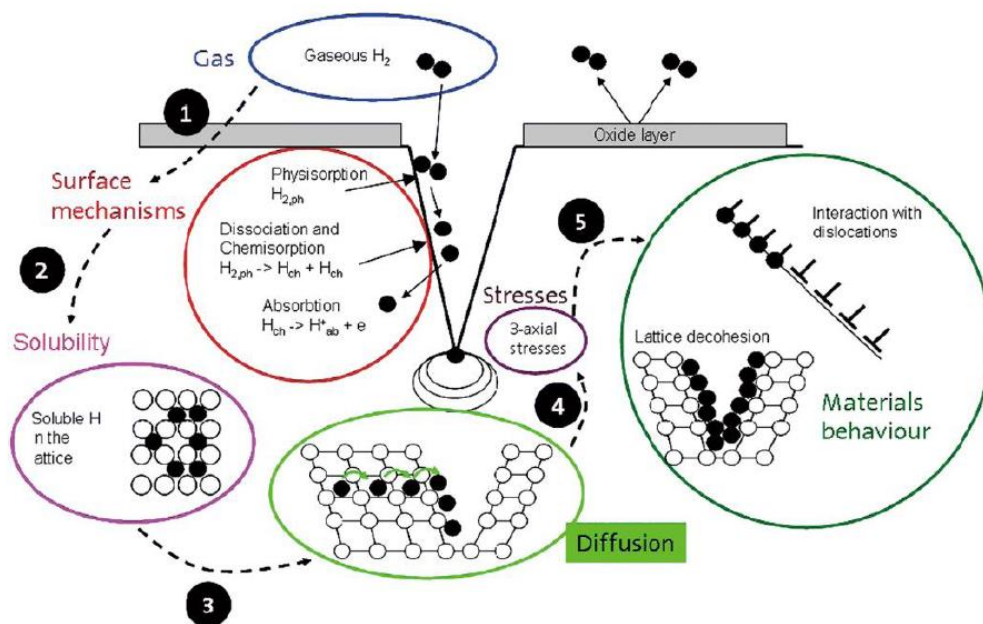


Heyrovského reakce pro neutrální a zásadité prostředí vypadá následovně.



2.1.3.2. Vstup z plynné fáze

Vstup do struktury je možný i z plynné fáze, a to pomocí fyzikální adsorpce a následné chemisorbce. Při fyzikální adsorbci dochází k adsorbci molekuly vodíku na povrch kovu pomocí Van der Waalsových sil. V dalším kroku se pomocí chemisorbce disociuje molekula na atomy vodíku a ty se shlukují na adsorbčních místech pomocí silných chemických vazeb. Ve finále jsou adsorbované atomy absorbovány do struktury a dále difundují do celého objemu materiálu. [1][5][15]



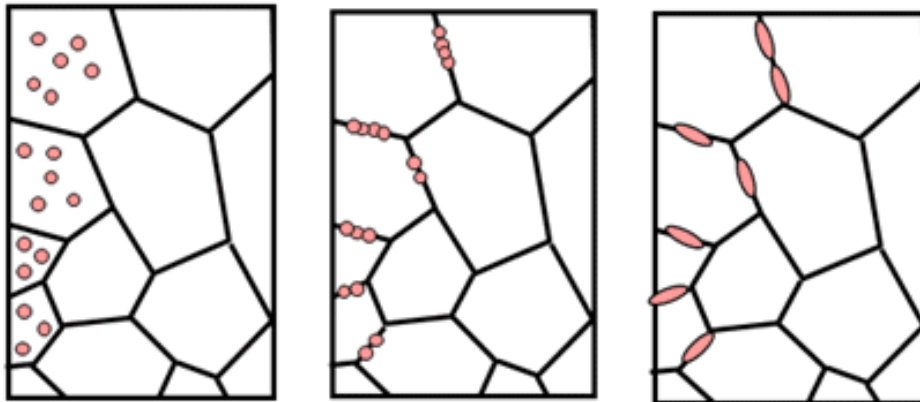
Obrázek 7: Schématické znázornění vstupu z plynné fáze [10]

2.1.4. Mechanismy vzniku vodíkové křehkosti

Teorii, které se snaží osvětlit výskyt, vznik a dopad vodíkové křehkosti je mnoho, ale žádná z nich nevysvětluje všechny jevy, které se ve struktuře dějí. Z tohoto důvodu se přistupuje k názoru, že je vodíková křehkost souhrou více mechanismů zároveň. Pro vysvětlení nevratného křehnutí se nejvíce používá vodíková tlaková teorie (HPT) a teorie HIPT (hydrogen-induced phase transformation), tedy vodíkem indukovaná fázová změna. Naopak pro pochopení vratného mechanismu křehnutí se nejvíce využívají teorie HEDE (hydrogen-enhanced decohesion), tedy teorie vodíkem zesílené dekoheze a HELP (hydrogen-enhanced localised plasticity), lokalizovaná plasticita zesílená vodíkem. Difuze vodíku do struktury předpínací výztuže může být souhrou více mechanismů za předpokladu obvyklé teploty. [1][14][15]

2.1.4.1. HPT - Vodíková tlaková teorie

Donedávna nejpoužívanější a nejrozšířenější teorií byla vodíková tlaková teorie. Základním principem celé teorie bylo zjištění, že se atomy vodíku hromadí uvnitř vad materiálu, kterými mohou být shluky vakancí, hranice zrn, dutiny nebo počínající trhliny. Následně dochází ke snížení pohybu dislokací. V těchto místech se následně dva atomární vodíky rekombinují v molekulu H_2 , která způsobí obrovské vnitřní tlakové pnutí, které dožadně převyšuje tahovou pevnost materiálu samotného. Následkem tohoto děje vznikají nové trhliny nebo se zvětšují již vzniklé. Tento mechanismus je bohužel nedostatečný pro popis celého děje, protože běžně dochází k porušení materiálu i při nízkých vnitřních tlacích. [1][16][17]



Obrázek 8: Schéma shlukování vodíku po hranicích zrn a následná tvorba trhlin [7]

2.1.4.2. HEDE – Vodíkem zesílená dekoheze

Tento mechanismus využívá předpokladu, že se atomární vodík hromadí a difunduje k vadám krystalické mřížky jako jsou intersticiály, vakance, hranice zrn a subzrn nebo precipitáty. V těchto místech dochází k poklesu pevnosti meziatomových vazeb díky přenosu elektronu z vodíku do nezaplňného orbitalu atomu železa. Tento jev může způsobit dekohezi kolem hranic zrn a iniciaci trhliny uvnitř materiálu. Lom vzniká pod přípustnou hodnotou pro daný materiál, kvůli snížení lomového napětí důsledkem poklesu kohezní pevnosti uvnitř krystalické mřížky. [1][10][17][18]

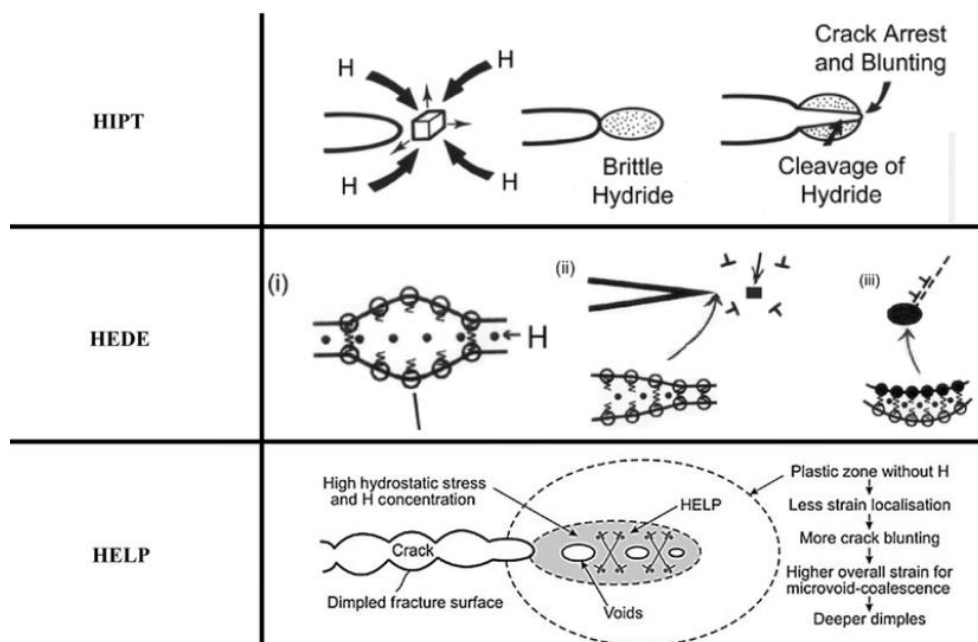
2.1.4.3. HELP – Lokalizovaná plasticita zesílená vodíkem

Dalším mechanismem popisující chování vodíku ve struktuře je tzv. lokalizovaná plasticita, kterou atomární vodík zesiluje. Jde o spolupůsobení dislokace u špičky trhliny a nahromaděného vodíku v okolí, který se zde shlukuje důsledkem působení hydrostatického tlaku. Druhou možností je, že je čelo trhliny místem, kde vodík přímo vstupuje do struktury. Pohyb dislokace je částečně usnadněn přítomností vodíku a důsledkem tohoto jevu je snížení meze kluzu. Vodík snižuje interakci dislokací a překážek, které by jinak pohyb zpomalovaly. V konečném důsledku se jedná o zrychlený pohyb dislokací, který vytváří mikro dutiny, jež jsou následně spojeny s rostoucí trhlinou. [1][16][17][19]

2.1.4.4. HIPT – Vodíkem indukovaná fázová transformace

Vodík může vyvolávat dva různé typy fázových transformací. První z nich je tvorba hydridů. Hydridy se jsou schopny vytvářet u tzv. hydridotvorných kovů jako jsou Zr, Nb, Ti nebo Ta. Tyto hydridy mohou ve struktuře vznikat pouze za předpokladu, je-li překročena mez rozpustnosti vodíku nebo mohou být indukovány i při nižších koncentracích, ale při působení většího napětí. Hydridy, které jsou indukované zvětšeným napětím jsou zpravidla umístěny lokálně, a to v místech, kde se kvůli gradientu napěťového pole překročí rozpustnost vodíku v materiálu. Vodík difunduje do míst na čele trhliny, kde se zároveň shlukuje a vytváří hydridy. Hydridy následně tvoří rovinu, kde dochází ke vznikům trhlin, které vedou až do míst rozhraní hydrid-matrice.

Druhou formou fázové transformace je martenzitická transformace, která je zkoumána zejména u austenitických ocelí. V podstatě se jedná o přeměnu austenitické fáze γ na α -martenzit a ϵ – martenzit. Přeměna $\gamma - \alpha$ se děje v agresivních prostředích před trhlinou. Transformace $\gamma - \epsilon$ je vyvolávána působením napětí. [1][10][14][18]



Obrázek 9: Schématické znázornění mechanismů vodíkové křehkosti [30]

2.1.4.5. HESIV – Indukce vakancí zesílená vodíkem

Teorie HESIV se zaměřuje na zkoumání vodíku z pohledu tvorby vakancí a vakančních shluků. Pokud vodík reaguje ve struktuře materiálu s přítomnými vakancemi, snižuje se následně energie pro tvorbu dalších vakancí. Ve výsledku jde tedy o to, že při plastické deformaci materiálu je koncentrace vakancí řádově větší. Vakance se lokálně shlukují a tvoří takzvané klastry, které mohou v konečném důsledku tvořit mikropóry. [1][7][10][14]

2.1.5. Difuze vodíku

Přenos hmoty v tuhé fázi je možný pomocí způsobu zvaný difuze. Jde o pohyb atomu, iontu nebo elektronů v návaznosti na ostatní částice tuhé fáze. Hybnou silou celého procesu je gradient koncentrace. Tímto jevem dochází ke změnám chemického složení jednotlivých fází a k přenosu hmoty dochází i přes fázová rozhraní, jestliže je difundující prvek alespoň částečně rozpustný v dané fázi. Fyzikálně-chemické jevy, které ovlivňují difuzi jsou zejména adsorbce atomů a disociace molekul. Jak bylo popsáno v kapitolách výše, vodík je schopný difuze díky velmi malému atomovému poloměru.

V ocelích se vodík vyskytuje v intersticiálních polohách krystalické mřížky, stejně jako většina prvků s malým atomovým poloměrem. Prvky s většími poloměry naopak obsazují substituční polohy.

Vodík se v neporušené mřížce pohybuje podle pravidel intersticiální difuze a lze u něj využít první Fickův zákon. [1][10][19]

$$J = -D \frac{dc}{dx} \quad (12)$$

, kde J je hustota difuzního toku, D je difuzní koeficient, c je koncentrace vodíku.

Vliv teploty na difuzi je uveden ve vzorci č. 13, v rámci Arrheniova vztahu pro difuzní koeficient.

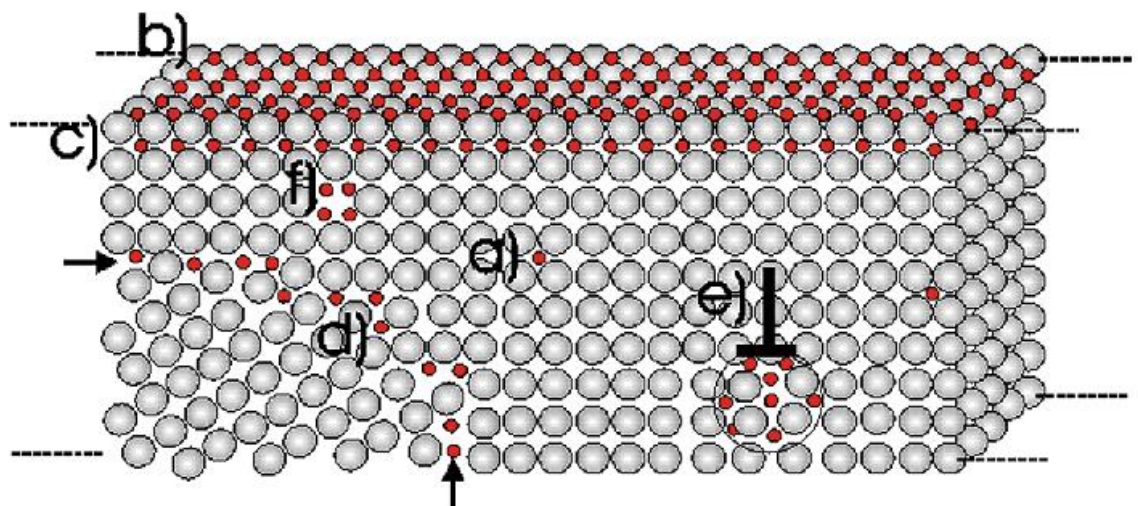
$$D = D_0 \cdot \exp \left(-\frac{E}{RT} \right) \quad (13)$$

, kde D_0 je max. dif. koeficient, R je plynová konstanta a T absolutní teplota E je aktivační energie.

Stejně jako u ostatních intersticiálních prvků, platí i pro vodík, že difunduje mnohem snadněji v kubické prostorově středěné mřížce BCC než v kubické plošně středěné mřížce FCC. Ze vzorců je patrné, že se zvyšující se teplotou rychlost difuze stoupá. Dalšími faktory, které ovlivňují rychlost difuze je koncentrace vodíku. Právě napětí má esenciální vliv na dislokaci, díky které se vodík může pohybovat významně rychleji než při využití intersticiální difuze. Jestliže se vodík pomocí dislokace přesune k hranici zrna, může dojít ke vzniku interkrystalické trhliny. [1][9][10][46]

2.1.6. Problematika vodíkových pastí

V rámci teorie vodíkové křehkosti je faktem, že se vodík ve struktuře shlukuje a kumuluje v určitých místech. Není tedy běžné, že by byl vodík ve struktuře koncentrován rovnoměrně. Koncentrace vodíku v jednotlivých místech je rozdílná mnohdy i řádově a ve většině míst se výrazně liší od střední koncentrace, ať už k nižším nebo vyšším hodnotám. Jako vodíkové pasti se nazývají právě ta místa, která svou vysokou koncentrací vodíku vyznačují. Vodíkové pasti jsou v praxi vady krystalické mřížky, např. dislokace, vakance, intersticiály, hranice zrn a subzrn, fázové rozhraní, ale také výrazně větší místa jako jsou póry, trhliny, vměstky nebo precipitáty. Slovo past naznačuje, že jsou atomy vodíku v těchto místech uzavřeny.

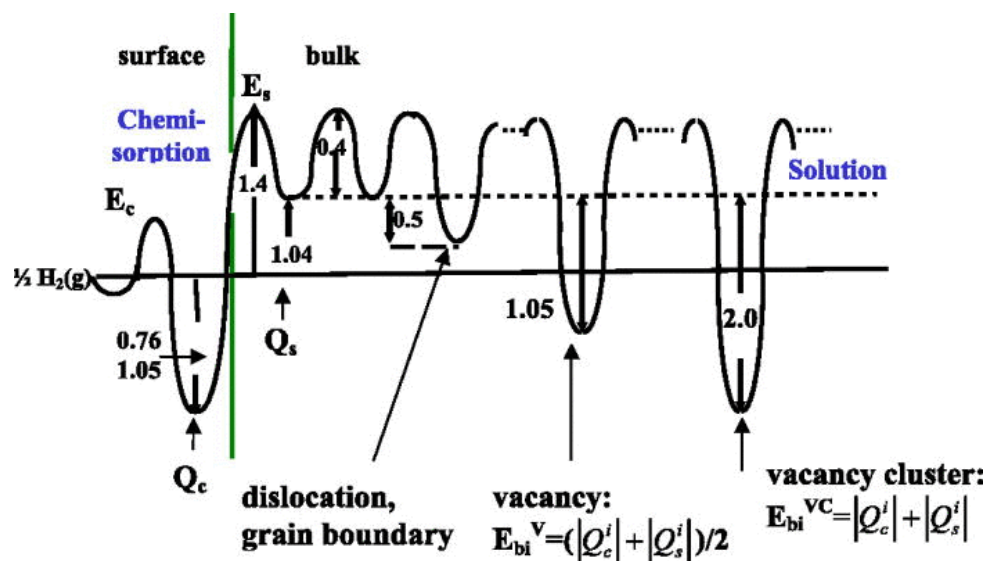


Obrázek 10: Typy vodíkových pastí [41]

Obrázek 10 poukazuje na jednotlivé typy vodíkových pastí v rámci krystalické mřížky kovu. Stříbrně jsou znázorněny atomy kovu, červeně atomy vodíku.

- a) Intersticiální past
- b) Povrchové pasti
- c) Podpovrchové pasti
- d) Pasti po hranicích zrn
- e) Dislokační pasti
- f) Past u shluku vakancí

Pokud jde o vysvětlení tohoto jevu z hlediska termomechaniky a kinetiky soustavy, je situace velmi složitá. Z pohledu kinetiky je vodíková past místo, ve kterém se atom vodíku pravděpodobněji přesune z intersticiální polohy do polohy pasti než naopak.



Obrázek 11: Graf energetických hladin jednotlivých vodíkových pasti [42]

Vodíkový atom v podstatě hledá energeticky nejstabilnější polohu, která se nachází ve vodíkových pastech, ze kterých už se v některých případech nemusí dostat bez dodání vnější energie. Pasti se dělí na reversibilní, ze kterých se je vodík schopen dostat sám bez vnějšího zásahu zpět do intersticiální polohy a na ireversibilní pasti, ve kterých už vodík zůstane. Graf výše naznačuje, že vodíková past dislokace a hranice zrn je reversibilní, protože není třeba dodat velké množství energie oproti pasti vakanční nebo shluku vakancí.

2.1.7. Eliminace vodíkové křehkosti

Jestliže se ve struktuře nachází vměstky, nečistoty nebo vady typu póru a trhlin, tak má vodík tendenci vyhledávat tato místa a usazovat se v polohách, kde ovlivňuje

krystalickou mřížku a snižuje tím mechanické vlastnosti součástí. Tento typ vodíkového křehnutí se nazývá nevratný, jak bylo popsáno již v kapitole 2.1. U vratné vodíkové křehkosti není nutný žádný zásah a vodík ze struktury uniká samovolně.

Pro správné fungování, spolehlivost a předcházení destrukci dílu je nutné vodík odstranit nebo preventivně předcházet vnikání vodíku do struktury.

Pokud se jedná o nevratný děj, je nutné použít tepelné zpracování k odstranění vodíku ze struktury. V běžné praxi se využívá žíhání v rozmezí teplot 200-230 °C po dobu 2 až 8 hodin. Tato operace by měla probíhat co nejdříve po procesech, kdy se může vodík do struktury dostat. Doporučená teplota by se neměla překračovat, jinak by žíhání mohlo ovlivnit strukturu kalených součástí. Tento proces by měl eliminovat vodík z míst kolem nečistot, vměstku, vad a vodíkových pastí. Pokud dojde k rekombinaci dvou atomů H v molekulu H₂, tak už nelze dostat vodík ze struktury vlivem násobného zvětšení molekuly.

Důležité je také předcházení expozici vodíku, pokud je to možné, zejména u vysoce namáhaných součástí. Základním krokem je odstranění vnitřních pnutí a koncentrátorů napětí v materiálu, protože se v těchto místech vodík zpravidla kumuluje. V oblasti povrchových úprav, kdy se vodík zpravidla dostává do struktury při moření a elektrolytickém odmaštění, je záhodno využít alternativní řešení, jako je změna polaritý elektrolytického odmaštění, snížení času moření nebo využití vícestupňové odmaštění. [5][15][46]

2.2. Předpjaté betonové konstrukce

Se vzestupem využívání betonu jako konstrukčního prvku se neustále zvyšovaly i nároky na jeho mechanické vlastnosti. Tento jedinečný materiál byl neustále vylepšován do vyšších pevnostních tříd přidáváním různých přísad, lepších typů cementu, plastifikátorů a dalších. Velkým objevem bylo také vytvoření kompozitního betonu přidáním ocelové betonářské výztuže. Bohužel žádná z těchto variant nedokázala zcela vyřešit nízkou pevnost betonu v tahu. Konkrétně mluvíme o hodnotách až 25x menších pro mez pevnosti v tahu oproti mezi pevnosti v tlaku. Přelomové řešení se objevilo až koncem 19. století, kdy se přišlo s koncepcí předpjatého betonu. [20][21]



Obrázek 12: Venezuelský most z předpjatého betonu General Rafael Urdaneta [38]

2.2.1. Historie předpjatého betonu

Koncem 19. století se paralelně vyvíjely první předpjaté prvky z betonu a to inženýrem P.H. Jacksonem v Kalifornii v roce 1886 a C. E. W. Doehringem v Německu v roce 1888. Jackson využíval napnuté ocelové pruty v betonových obloucích. Doehring navrhl celou výrobu betonových nosníků a desek vyztužených pomocí drátů, které byly napnuty ještě před zatížením. Bohužel se zjistilo, že počáteční tlakové napětí z betonu postupem času mizí. První užití vysoce pevných drátů bylo v roce 1919, kdy K. Wettstein použil struny klavíru pro předepnutí betonových střešních panelů. V roce 1928 byl poprvé využit předpínací drát o vysoké pevnosti francouzským inženýrem Eugenem Freyssinetem. Využití vysokopevné oceli bylo pro udržení vysoké úrovně předpětí v průběhu času esenciální. Franz Dischinger v roce 1939 vydal první odbornou publikaci o ztrátách předpětí v důsledku smršťování a dotvarování. První předpjatý most byl vystavěn v roce 1941 právě Freyssinetem. [20][28]



Obrázek 13: Pont de Luzancy, první předpjatý most ve Francii [39]

Při dřívějších pokusech o předepínání s výztužemi o pevnostech kolem 300 MPa bylo dosaženo poměrného přetvoření přibližně 0,0015. Pokud se využije výztuž s pevností 1 000 MPa bude poměrné přetvoření 0,005. Při tomto faktu je ztráta předpětí smršťováním a dotvarováním kolem 20 %, což je vyhovující. Tímto objevem začala éra významného rozvoje předpjatých konstrukcí. V českých zemích nastal rozvoj těchto konstrukcí až v polovině 20. století. [20][21]

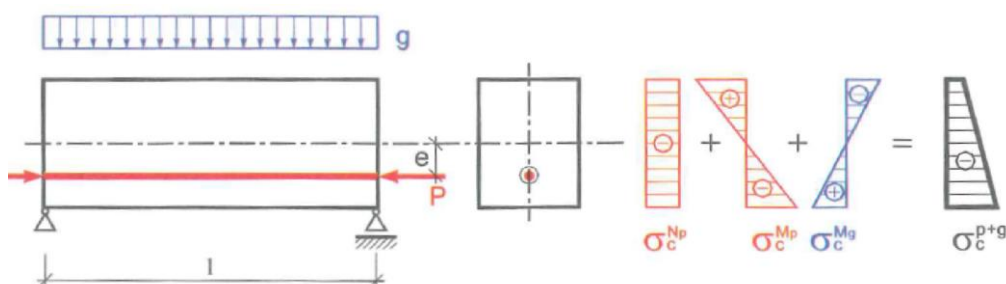
2.2.2. Podstata předpjatého betonu

Základní myšlenkou celého objevu bylo, že beton má relativně dobré pevnostní vlastnosti při tlakovém zatížení, ale o mnoho horší při zatížení tahovým. Proto byla u železobetonových konstrukcí snaha o přenesení tahového napětí pomocí výztuže a tlakového napětí pomocí betonu. [20][22][25]

Tabulka 1: Tlakové a tahové vlastnosti základních pevnostních tříd betonu [40]

Charakteristika betonu		Pevnostní třídy betonu														
		C 12/15	C 16/20	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 35/45	C 40/50	C 45/55	C 50/60	C 55/67	C 60/75	C 70/85	C 80/95	C 90/105	C 100/115
Pevnost v tlaku a tahu	f_{ck} [MPa]	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	100
	$f_{ck,cube}$ [MPa]	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	115
	f_{cm} [MPa]	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	108
	f_{ctm} [MPa]	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2
	$f_{ctk;0,05}$ [MPa]	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	3,7
	$f_{ctk;0,95}$ [MPa]	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6	6,8

Jinak tomu není ani u předpjatého betonu, ale navíc je předpínací lano napnuto skrz celý prvek a vnáší do něj přídavná tlaková napětí vyvinutá sepnutím těchto lan. Přídavná napětí mohou být využita jako tlaková rezerva při potenciálním přenosu zatížení. Tím opět zaniká největší nevýhoda betonu, tedy nízká pevnost v tahu. Teoreticky se touto koncepcí vylučuje tahové napětí v betonu. [20][23][29]



Obrázek 14: Schematické znázornění rozložení napětí [20]

2.2.3. Koroze předpínací výztuže

Jedním z nejzásadnějších faktorů ovlivňující životnost a spolehlivost předpjatých betonových konstrukcí je koroze na předpínacích výztužích. Stejně jako většinu ocelí, tak i předpínací lana velmi značně ovlivňuje koroze. Výztuže jsou z výroby opatřeny pouze tenkou ochranou vrstvou oleje, protože je předpokládáno, že se v kanálcích po celé délce zainjektují injektážní maltou, která je navržena přímo k těmto účelům. Pokud dojde k větším korozním úbytkům nebo dokonce v překorodování předpínacích výztuží, násobně se zvyšuje riziko zřícení konstrukce.

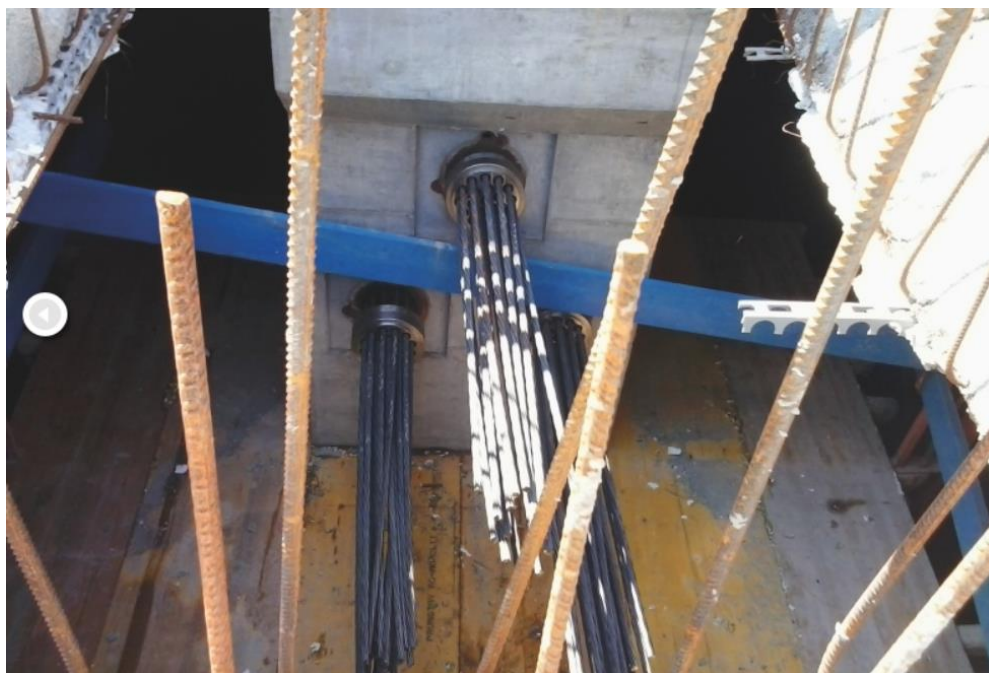
V praxi je bohužel relativně často k vidění, že kanálky s předpínacími lany nejsou zainjektovány v celém objemu, a tím vzniká místo pro vtok vody. Jestliže jsou špatně utěsněny příčné spáry mezi jednotlivými segmenty, je přítomnost vody v prostorách kolem výztuže jistá i pokud jsou důkladně zainjektovány. Z těchto míst se už voda nemá kam dostat a vzniká tak dokonalé prostředí pro korozní děje. U některých typů mostů je také běžná vysoká koncentrace chloridových iontů, které usnadňují anodické rozpouštění.



Obrázek 15: Dutina v injektážním kanálku a koroze předpínací výztuže [foto autora]

Ve výsledku se jedná o korozi plošnou, ale i důlkovou a štěrbinovou. Pokud není výztuž dokonale zainjektovaná, podléhá koroznímu ději velmi rychle. V České republice jsou známy případy, kdy za 30 let překorodovalo celé předpínací lano o průměru 15,7 mm.

Podle normy ČSN 73 6221 je most v havarijním stavu, jestliže je úbytek na předpínací výztuži více jak 5 % průřezu. V realitě to znamená, že na lanech o průměru 15,7 mm, kde mají jednotlivé dráty průměr 5,2 mm, se jedná o korozní úbytek v kolem 260 mikrometrů. [2][8][20][35][47]



Obrázek 16: Kotvení předpínach lan [34]

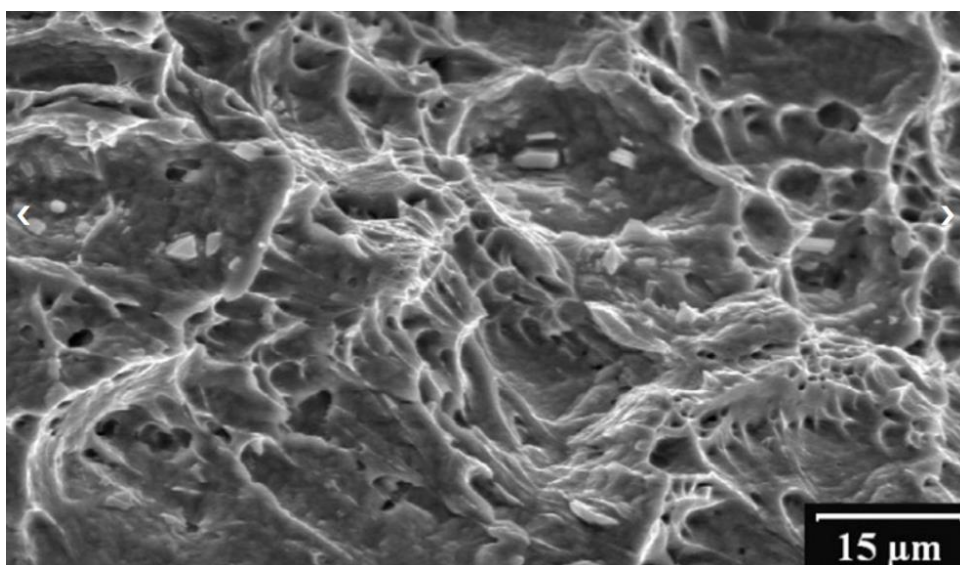
2.3. Základy teorie lomů

V praktické části práce byly fraktograficky vyhodnocovány lomové plochy jednotlivých vzorků po zkoušce tahem. V kapitole teorie lomů jsou osvětleny pojmy, které jsou využívány pro analýzu lomových ploch a jsou esenciální pro pochopení povahy a chování materiálu.

Lomová mechanika je obor, který důkladně analyzuje veškerá kritéria a možnosti, které mohou mít vliv na tvorbu lomů v materiálu. Jedním z nejdůležitějších pojmů je lomová houževnatost. Tento pojem lze vysvětlit jako charakteristiky odpor materiálu k iniciaci a růstu trhlin. Houževnatost je v podstatě schopnost pohlcovat energii před prvními známkami trhlin a porušení. Z mikrostrukturního hlediska je iniciace trhliny přerušeni meziatomových vazeb na čele trhliny. Podle toho jak rychle, za jaké teploty nebo jakým mechanismem byla trhlina iniciována, se tvoří různé druhy lomových ploch a jejich morfologie. Z pohledu potřebné energie a morfologie se lomy dělí na dvě základní skupiny: tvárný (houževnatý) a křehký lom. [3][43]

2.3.1. Tvárný lom

Tvárný lom, někdy též nazývaný houževnatý, je energeticky mnohem více náročný a zpravidla vzniká po plastické deformaci. Typická je struktura lomové plochy, která je velmi členitá, obsahuje nespočet miniaturních dutinek a výstupků, jejichž vznik je zapříčiněn poruchami krystalické mřížky, vměstky nebo jinými částicemi. S dalším přidáváním energie se můstky u výstupku ztenčují až se nakonec úplně přeruší a dojde k lomu. Na lomové ploše jsou dobře patrná místa, kde se nacházely dutinky a kde se spojovaly výstupky až do poslední chvíle. Dalším důležitým znakem tvárného lomu je transkrystalický charakter. Lom tedy prochází skrz jednotlivá zrna materiálu, nikoliv po hranicích. Transkrystalický lom lze jednoduše poznat z dutinové morfologie povrchu. V praxi je však možné, že bude tvárný lom interkrystalický. To je ovšem způsobeno hromaděním poruch do okolí hranic zrn. Tento jev způsobují částice sekundárních fází, intermetalické fáze nebo shluky vad. [3][43][44]



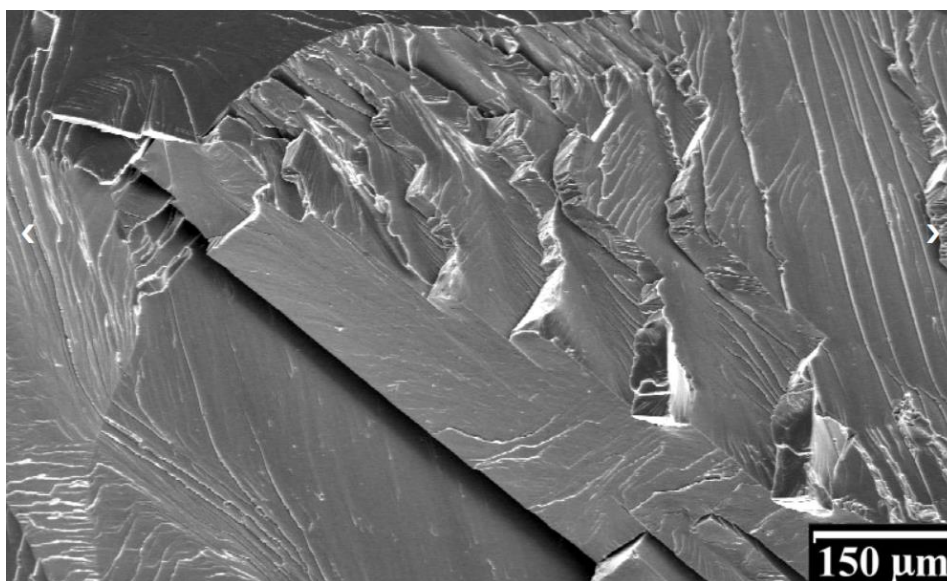
Obrázek 17: Tvárný lom [43]

2.3.2. Křehký lom

Křehký lom, někdy označovaný jako štěpný, je energeticky méně náročný a nastává při napětích okolo meze kluzu bez značné plastické deformace a případné tvorby krčku. Křehký lom je ve většině případů nežádoucí a je ovlivněn řadou faktorů jako jsou například:

- Snížená teplota
- Zvýšená rychlost zatěžování
- Chemické složení a čistota materiálu
- Výskyt vrubu nebo jiného koncentrátoru napětí
- Výskyt vad uvnitř materiálu
- Tloušťka materiálu

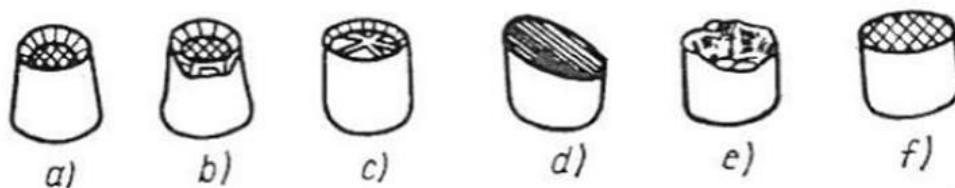
Při zvýšené rychlosti zatěžování není materiál schopen absorbovat velké množství energie a reagovat změnami v krystalické mřížce. [3][43]



Obrázek 18: Křehký lom s charakteristickými fasetami [43]

2.3.3. Další dělení lomů

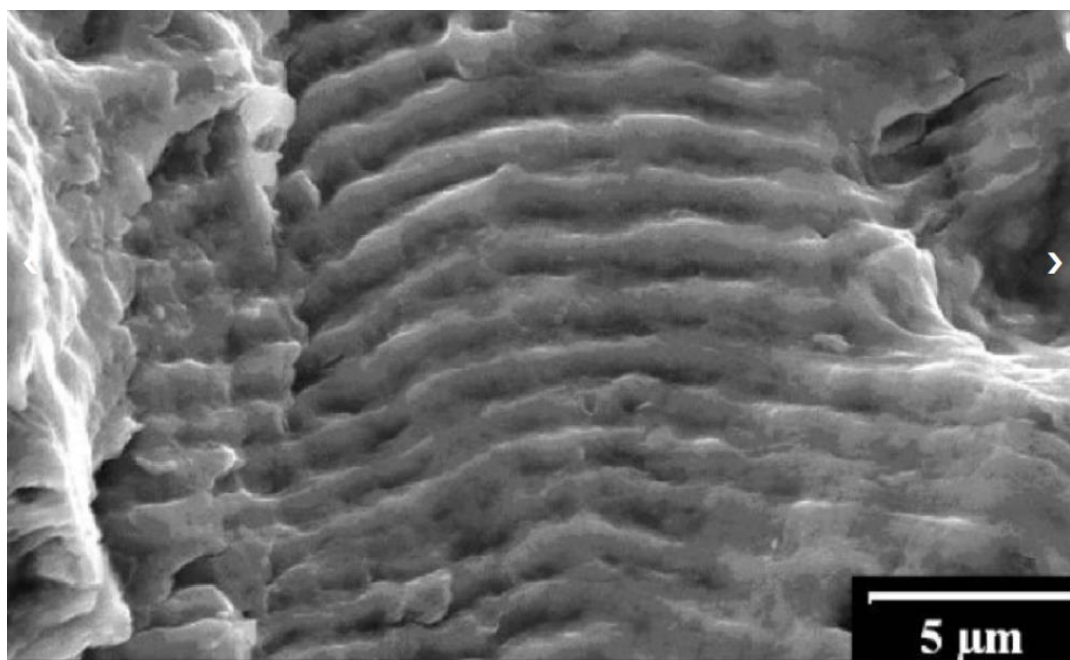
V dnešním světě existuje nespočet tříd oceli, slitin kovů, ale i nekovových materiálů. Každý z těchto materiálů má své specifické lomové chování, které ani zdaleka nelze popsat pouze křehkým nebo houževnatým lomem. Z těchto důvodů se tvoří nové podskupiny dělení lomových ploch. Některé materiály vykazují smíšené lomy (e), kde se spojuje morfologie tvárných (a, b) i křehkých (f) lomů. [3][44]



Obrázek 19: Další typy lomových ploch [44]

V některých případech může docházet k tzv. smykovým lomům (d), který je zpravidla šikmý a bez významné tvorby krčku. Pokud je součást exponována v korozním prostředí, může docházet ke koroznímu praskání, které má rovněž svůj specifický lom. Dalším specifikem je únavový lom, který je charakterizován jasně patrným místem iniciace a oblastí šíření připomínající lamely. [44]

Praktická část této diplomové práce využívá vzorky z předpínacích výztuží, které dosahují vysokých pevností až kolem 1 900 MPa. Pro tvářené vysokopevné materiály je typický tzv. frézovitý lom s krčkem, který je na obrázku výše (c). Snímky z elektronového mikroskopu zachycující frézovité lomy vzorků předpínacích lan jsou uvedeny v kapitole 3.10. Analýza lomových ploch.

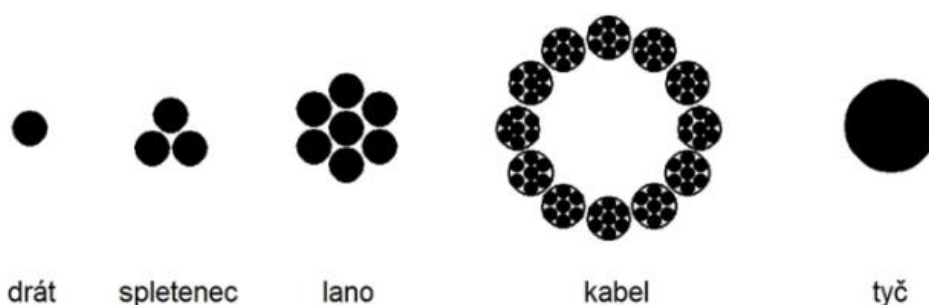


Obrázek 20: Lamely únavového lomu [43]

3 PRAKTICKÁ ČÁST

3.1. Cíle praktické části

Cílem praktické části je ověření pronikání vodíku do struktury oceli předpínacích lan konvenčně používaných pro betonové konstrukce s většími rozpětími jako jsou silniční a železniční mosty, lávky a jiné prvky. Tedy ověření vzniku vodíkové křehkosti v rámci oceli, které se používají na výrobu sedmidrátových lan – předpínacích výztuží.



Obrázek 21: Názvosloví předpínacích prvků [31]

Unikátnost experimentální části, který hodnotí vliv vodíkové křehkosti na změnu mechanických vlastností předpínací výztuže, je v expozici celého svazku drátů předpínací výztuže (reálného lana obsahujícího celkem 7 drátů).

Pro tento účel byl realizován experiment, v rámci kterého budou exponovány vzorky předpínacích lan ve vodném roztoku síranu sodného. Galvanostatickým rozkladem vody vznikne na výztuži atomární vodík, který je schopen difundovat do krystalické mřížky ocelí. Po vyjmutí z roztoku je plánováno předpínací výztuž podrobit zkoušce tahem a porovnat výsledky s referenčními hodnotami. Je plánováno stanovit různé časové intervaly expozice a zkoumat pokles mechanických vlastností exponovaných vzorků v závislosti na době expozice.

V rámci dalších cílů experimentu by měly být vytvořeny metalografické výbrusy ze zkoušených předpínacích výztuží a zkoumány pod mikroskopem. V rámci mikroskopie by se měla provést i analýza lomů přetržených drátků po zkoušce tahem a provést fraktografické vyhodnocení lomových ploch.

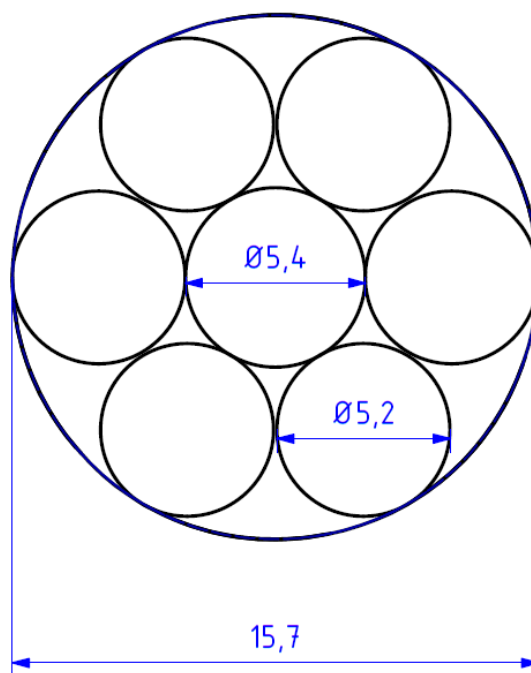
3.2. Specifikace zkušebních vzorků předpínací výztuže

Vzorky použité pro experimentální část diplomové práce jsou konvenční předpínací lana, která se běžně používají pro předepínání mostů a jiných konstrukcí s velkým rozpětím na území celé České republiky i ve zbytku světa. Sedmidrátové pletence, které byly využity pro tuto práci, byly dodány firmou Freyssinet. Konkrétně se tyto lana importují z Nizozemska od firmy Nedri Werk Hamm se sídlem ve Venlo. Nejbližší továrna, kde se předpínací lana vyrábí, se nachází ve slovenském Hlohovci v továrně firmy Bekaert.



Obrázek 22: Rozpletené předpínací lano po zkoušce tahem

Pro různé aplikace se využívá jiného průměru sedmidrátových pletenců s tím, že je běžné, že šest obvodových drátků má nepatrně menší průměr než jeden centrální drátek. Nejběžněji využívané pletence pro mostní konstrukce jsou označovány jako 15,7, které mají průměr centrálního drátu 5,4 mm a okolní dráty o průměru 5,2 mm. Jmenovitý průměr těchto lan je tedy přibližně 150 mm². Mez pevnosti by měla dosahovat hodnot alespoň 1 860 MPa a modul pružnosti by se měl pohybovat kolem 195 GPa. Zbytek požadovaných hodnot je k vidění v tabulce č. 2.



Obrázek 23: Schématický řez sedmidrátových pletencem

Konvenčně se předpínací lana vyrábí kombinací tvářecích technologií, zejména tažením za tepla a následným splétáním na automatizované lince. Pro tyto účely je důležité udržovat čistotu tavby a technologické podmínky. Dosahovat hodnot pevnosti kolem 1860 MPa není běžné pro oceli legované pouze křemíkem a manganem.

Tabulka 2: Parametry jednotlivých typů předpínacích výztuží

Vlastnost	Symbol	Jednotka	Hodnoty					
Pevnost v tahu	R_m / f_{pk}	MPa	1770	1860				
Sedmidrátový pramenec (lano)								
Jmenovitý průměr	D	mm	15,3	15,7	12,5	12,9	15,3	15,7
Jmenovitá průřezová plocha	S_n	mm ²	140	150	93	100	140	150
Jmenovitá hmotnost ($\pm 2\%$)	M	kg/m	1,100	1,180	0,726	0,781	1,093	1,172
Povrch hladký								
Charakteristická hodnota síly na mezi kluzu 0,1 %	$F_{p0,1k}$	kN	218	234	152	164	229	246
Charakteristická hodnota síly na mezi pevnosti	F_{pk}	kN	248	266	173	186	260	279
Modul pružnosti	E	MPa	cca 195 000					
Minimální tažnost	A_{gt}	%	3,5					
Maximální relaxace při 1000 hod a 70% F_{ma}		%	2,5					

Chemické složení tavby pro výrobu předpínacích lan není nikterak utajované a v rámci různých výrobců se obvykle neliší. Jedná se o ocel, která se skládá z desetin procent uhlíku, manganu a křemíku. Větší důraz se klade na nízké obsahy nečistot jako je síra, fosfor a dusík. Spojením síry s manganem může vzniknout sulfid manganatý MnS, který je známý právě jako jedna z vodíkových pastí. Reálné chemické složení vzorků oceli pro tuto diplomovou práci je uvedeno v tabulce č. 3. Toto chemické složení je převzato z dodacího listu výrobce.

Tabulka 3: Chemické složení oceli pro použité předpínací výztuže

Chemické složení					
C	Mn	Si	P	S	N
0,83	0,73	0,26	0,008	0,008	0,004

3.3. Příprava vzorků

Vzorky přivezené od nizozemské firmy se dodávají v dlouhých metrážích namotané na cívkách, které se musí následně zkrátit. První krok přípravy vzorků je tedy řezání vzorku na délky 1 800 mm, které se podle běžné praxe používají na akreditovanou zkoušku tahem podle normy ČSN EN ISO 15630-3 (420365), konkrétně podle části 3: Oceli pro předpínání. Řezání by nemělo tepelně ovlivňovat strukturu oceli.



Obrázek 24: Cívka s předpínacím lanem

Aby byla předpínací lana chráněna před korozi a okolními vlivy, dodávají se už z výroby konzervované pomocí olejů, nebo jiných konzervačních maziv. Tyto látky by mohly zabraňovat prostupu vodíku do struktury kovu. Proto je druhou nezbytně nutnou předúpravou odmaštění povrchu vzorku. Pro odmaštění lan byl použit technický benzín.

Hned po řezání a odmaštění vzorku byly vzorky instalovány do zkušebních boxů, do kterých se následně přilévало reakční médium, nasycený vodný roztok síranu sodného. Do krabic byly z boku vrtány díry, kterými se lano provléká a následně musí utěsnit, aby médium nevytékalo ven. Toto utěsňování bylo provedeno pomocí izolačních o-kroužku a izolační pásky. Závěrem byl aplikován tekutý transparentní silikon pomocí vytlačovací pistole. Ani takto důsledné zatěsnění nebylo dostatečné, protože médium často vytékalo prostorem mezi jednotlivými drátky, ale jen ve velmi malé míře. Úbytek nebyl natolik významný, aby se musel roztok v průběhu experimentu dolévat.

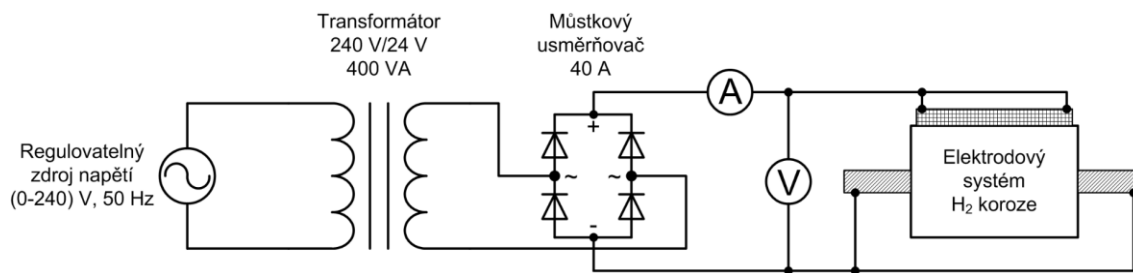


Obrázek 25: Konzervované a odmaštěné předpínací lano

3.4. Konvence galvanického zapojení

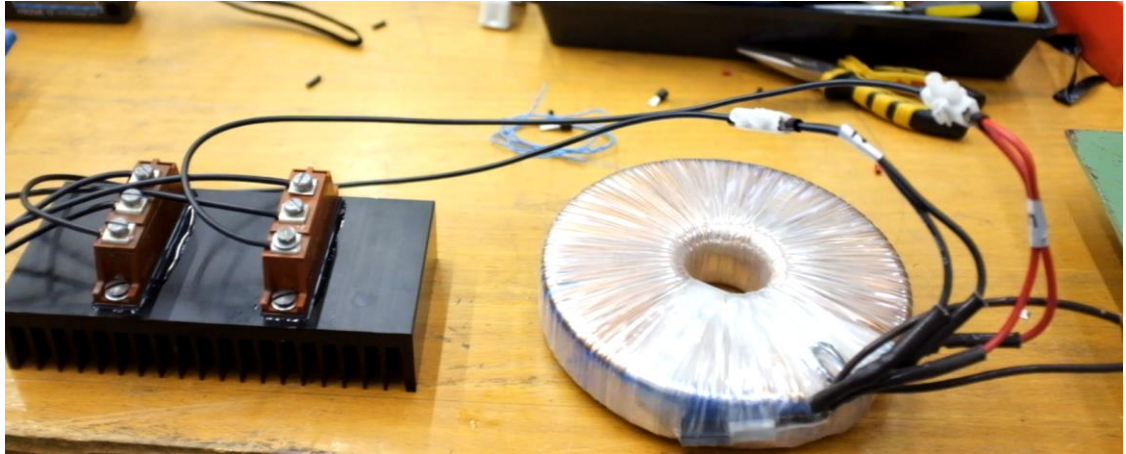
Na základě spolupráce s Ing. Hlaváčkem, Ph.D. z FEL ČVUT, byl navrhnut systém uspořádání experimentu, který by měl zajišťovat potřebné proudy k rozkladu vody. Na obrázku je uvedeno blokové schéma stejnosměrného zdroje proudu, určeného pro napájení elektrodového systému sestaveného za účelem zjišťování vlivu vodíkové křehkosti. Požadovaná efektivní hodnota stejnosměrného proudu pro tento elektrodový systém byla stanovena na 18 A, při efektivní hodnotě napětí 10 V. To odpovídá hodnotě impedance elektrodového systému přibližně 0,5 Ω .

Tato hodnota předpokládá použití elektrolytu ve formě nasyceného vodného roztoku síranu sodného.



Obrázek 26: Schéma zapojení

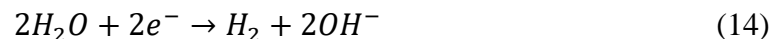
Obvod usměrňovače je napájen z regulovatelného zdroje střídavého napětí od nuly do 240 V o síťové frekvenci 50 Hz. Regulované napětí je přivedeno na vstup toroidního transformátoru s jmenovitým převodem 240 V/24 V a výkonem 400 VA. Výstupní napětí transformátoru je připojeno na střídavý vstup usměrňovacího můstku (Graetzův můstek), určeného pro usměrňování proudu do velikosti 40 A, při maximálním závěrném napětí usměrňovacích diod 600 V. Můstek je tedy pro tento účel předimenzovaný a byl vybrán z toho důvodu, že byl dostupný v místě realizace experimentu. Odvod ztrátového výkonu můstku je zajištěn dostatečně dimenzovaným hliníkovým chladičem, jehož žebra jsou pro zlepšení přenosu tepla ponořena do vodní lázně. Efektivní hodnota usměrněného výstupního napětí můstku je měřena pomocí voltmetru V, přičemž byl použit digitální multimetr Hioki DT4253, měřicí rozsah 60 V DC. Efektivní hodnota výstupního usměrněného proudu byla měřena ampérmetrem A, který byl realizován digitálním klešťovým ampérmetrem PROVA 11, měřicí rozsah 30 A DC. Kladná polarita výstupního napětí usměrňovacího můstku byla přivedena na dvě elektrody z korozivzdorné ocelové technické textilie z materiálu AISI 316L, které tvořily anodu elektrodeového systému. Záporná polarita byla přivedena na zkoumaný vzorek předpínacího lana, které tvořilo katodu.



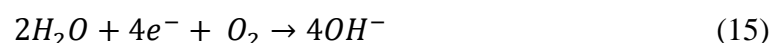
Obrázek 27: Usměrňovací můstek a toroidní transformátor

3.5. Elektrochemická podstata experimentu

Vývoj vodíku na exponovaném povrchu výztuže je zajištěn urychlením kinetiky koroze za redukce vodíku z vody, viz. reakce (14), vlivem katodické korozní reakce v režimu katodické polarizace příčinného povrchu. Vlastní katodická polarizace probíhá v režimu galvanostatickém, tedy udržováním stálé hodnoty procházejícího stejnosměrného proudu, nikoli potenciostatickém, udržování stálé hodnoty potenciálu, tedy oxidační vlastnosti prostředí, mezi exponovaným povrchem kovu a referenční elektrodou.

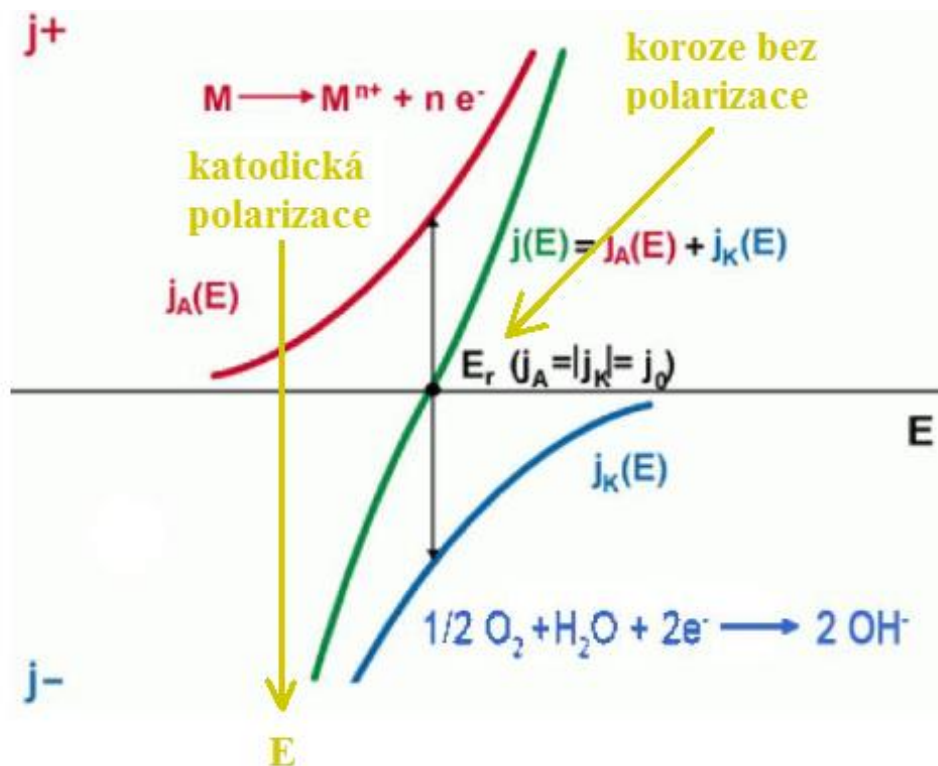
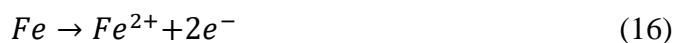


Vlivem katodické polarizace, zapojením exponovaného vzorku předpínací výztuže jako (-) pól v rámci realizace zapojení elektrolyzéry, dochází k urychlení koroze povrchu oceli v redukčních podmínkách (míra redukčních podmínek je dána mírou katodické polarizace) za vývoje plynného vodíku s významným parciálním tlakem plynu nad volným povrchem exponovaného vzorku. Pokud by nedošlo k polarizaci povrchu výztuže vlivem zapojení stejnosměrného zdroje proudu, korodoval by povrch výztuže ve vodném prostředí pozvolna za katodické korozní reakce redukce atmosférické kyslíku (15).



Pozvolné korozní poškození za rovnovážných podmínek je dáno ustavením samovolného korozního potenciálu E_{kor} (E_r – rovnovážný potenciál) a kinetika korozního procesu je dána výměnou proudovou hustotou dle funkčních vlastností

Butler-Volmerova vztahu (viz obrázek č. 28). Ustálení korozního potenciálu při polarizaci je na daném grafu vyznačeno žlutě. Anodický děj, neboli vlastní oxidace povrchu kovu za vzniku Fe^{2+} , je dána rovnicí (16).

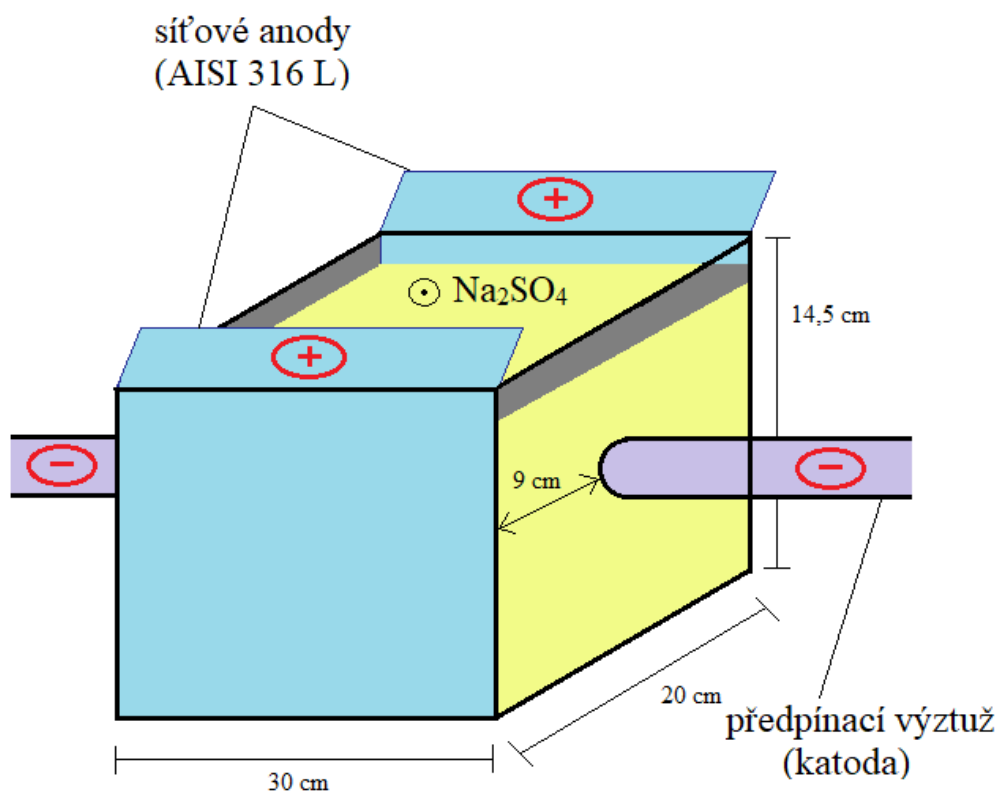


Obrázek 28: Zobrazení křivek $j(E)$ pro korozní děj – vyznačení samovolného korozního potenciálu E_{kor} (E_r) a korozního potenciálu E při katodické polarizaci

Následně vlastní katodický děj je uspišen (vlivem procházejícího proudu dochází k polarizaci povrchu) na úkor anodického děje, jehož průběh je výrazně potlačen (viz rovnice 16). Silně redukční podmínky zajišťují korozi povrchu výztuže za vývoje vodíku v Butler-Volmerově vztahu.

Při vlastním experimentu je využito plastového boxu vyhovujících rozměrů, kde do středu byly vyvrtány otvory pro uložení vzorku předpínací výztuže (expozice středové části 1,7 m dlouhého lana). Do boků plastového boxu až ke stěnám byla vložena síťovina z korozivzdorné oceli AISI 316L. Tato dvojice jemných sítí sloužila jako anoda (jedná se o obětovanou anodu v rámci zapojení elektrolyzéry). Vlastní vzorek povrchu předpínací výztuže byl tedy veden mezi těmito sítovinami.

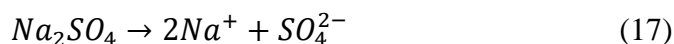
Vzdálenost mezi povrchem předpínací výztuže a povrchem síťoviny je symetrická v rozsahu přibližně 9 cm. Celková exponovaná délka lana byla 30 cm, při průměru lana 15,7 mm tomu odpovídá exponovaná plocha přibližně 150 cm². Schéma expoziční cely a vedení vzorku předpínací výztuže je na obrázku č. 29.



Obrázek 29: Schéma expoziční cely a vedení svazku předpínací výztuže jako zkušební vzorku

Z dříve získaných experimentálních údajů, souvisejících s katodickou ochranou ocelových potrubí umístěných v půdě, je zřejmé, že nadkritická proudová hustota (tzv. „přechráněný“ povrch ocelového potrubí), kdy dochází k tvorbě vodíku na povrchu oceli je přibližně 100 mA.cm⁻² (dle druhu půdního elektrolytu). Tedy pro tento experiment byla zvolena stacionární proudová hustota 120 mA.cm⁻², se zárukou, že je dostačující pro významné urychlení kinetiky tvorby atomárního vodíku na povrchu výztuže. Celkový galvanostatický proud procházející vzorkem byl vypočten z celkové plochy části vzorku v cele a stacionární proudové hustoty na hodnotu přibližně 18,3 A. Při průchodu proudy předpínací výztuží dochází k zahřívání roztoku (Joulovo teplo). Celková teplota expozičního roztoku je držena na hodnotě 30 – 50 °C manuálním přidáváním ledové tříště. Pro zvýšení vodivosti je do roztoku před expozicí přidáván Na₂SO₄. Pro každou expozici byl vytvořen

nový nasycený roztok této látky s rozpustností 20 g/100 g H₂O (20 °C), tak aby na dně lázně byl vytvořen sediment síranu sodného jako ověření přesycenosti. Celková vodivost roztoku byla větší než 115 mS.cm⁻¹. Tato vodivost je dána vysokou rozpustností síranu sodného (roztok se vytváří bez změny pH) a jeho vysokou iontovou silou, která je dána disociací síranu sodného v roztoku podle rovnice (17).



Zapojení je zprostředkováno zdrojem stejnosměrného proudu s manuální regulací aplikované hodnoty, jak bylo zmíněno v kapitole 3.4. Konvence galvanického zapojení. Čas expozice je odečítán od vizuálně detekované doby vývoje prvních bublin vodíku na povrchu exponovaného pláště předpínací výztuže.

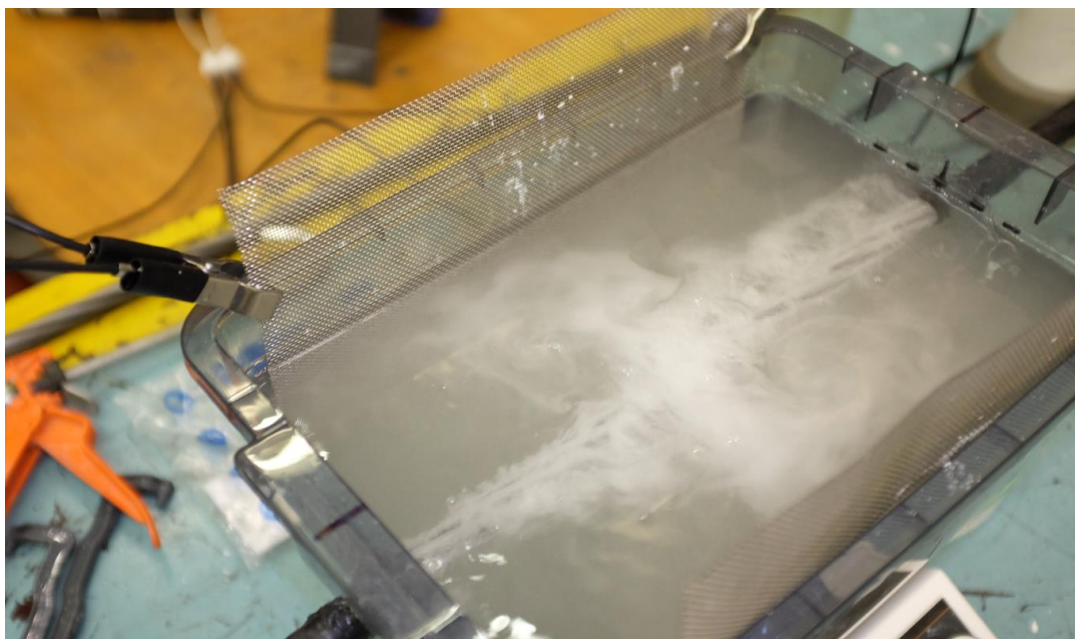
3.6. Expozice vzorků

Připravená zaizolovaná vana se vzorkem byla položena na magnetické míchadlo, které mělo zajišťovat proudění kapaliny a plynu uvnitř vany. Míchání je důležité zejména z důvodu odstraňování vrstev OH⁻ na povrchu výztuže. Přes tyto vrstvy by bylo zamezeno přístupu a difuzi vodíku. Po ověření funkčnosti míchadla bylo přilito médium, tedy roztok síranu sodného, aby byla celá plocha výztuže pod hladinou.

Po správném zapojení vzorků byl do obvodu puštěn proud, vypočítaný z proudové hustoty a celkové plochy části vzorku uvnitř vany. Celkový proud byl vypočten na 18,3 A, což znamenalo první větší problém, protože laboratoř na Kloknerově ústavu nedisponovala kapacitnějším zdrojem. Z tohoto důvodu bylo nutné experiment přesunout na Fakultu elektrotechnickou, katedru elektroenergetiky, konkrétně do laboratoře vysokých napětí.

3.6.1. Průběh expozice

Ihned po vpuštění proudu byla patrná tvorba plynu na katodě, tedy na předpínacím laně. Žádná patrná tvorba plynu na anodě, korozi-vzdorné technické textilii, nebyla viditelná, což potvrdilo správnost zapojení vzorku.



Obrázek 30: Tvorba vodíku na povrchu vzorku na počátku expozice

V průběhu experimentu se procházejícím proudem značně zahříval roztok síranu sodného, což nebyl žádoucí jev, protože tato skutečnost mohla vést sice k rychlejší difuzi vodíku do struktury, ale zároveň i k rychlejšímu úniku pryč ze struktury. Tímto jevem by po ukončení experimentu mohlo dojít k velmi rychlému úniku vodíku mimo strukturu vzorku, a tím nedosažení reálných výsledku. Vzhledem k faktu, že se roztok ohříval až na 50 °C během dvou hodin, bylo zvoleno chlazení ledovými kostkami, které pro tuto aplikaci bylo dostačující.

S postupujícím časem expozice se v roztoku rozpouštěly korozní produkty z korozivzdorné technické textilie, které dokázaly celou lázeň zbarvit až do tmavě hněda, ale tím i pravděpodobně zvyšovaly vodivost roztoku. V rámci analýzy bylo měřeno pH v rozsahu celé expozice, ale nedocházelo k žádným změnám od běžné hodnoty destilované vody 6,4-7 pH.

Ať už byla prováděna dvouhodinová nebo šestihodinová expozice, nedocházelo k žádným výraznějším změnám v chování v průběhu experimentu. Při šestihodinové expozici se pouze vyloučilo více korozních produktů, bylo třeba intenzivnější chlazení a spotřebovalo se větší množství dolévaného roztoku vody a Na_2SO_4 . Korozní produkty v lázni byly definovány jako $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$.



Obrázek 31: Stav lázně po hodině expozice

Po ukončení průchodu proudu byla lázeň vylita a následovalo vyjmutí předpínacích lan ze zkušební vany. Nutné bylo očistit izolační pásku, zbytky silikonu a usušit zkušební vzorek. Těsně před zkouškou tahem byla lana změřena a zvážena, kvůli ověření, zda nedocházelo k nějakému úbytku v průběhu experimentu. Hodnoty byly také použity pro přepočítání a ověření plochy S vzorku pomocí znalosti hustoty $\rho = 7,85 \text{ g.cm}^{-3}$, která se určila jako konstanta. Níže je uveden vzorec (18) pro výpočet plochy.

$$S_0 = \frac{m}{\rho \times l} \quad (18)$$

3.7. Zkouška tahem

Po skončení a vyjmutí předpínacích lan z lázně je nutné neprodleně vzorky podrobit zkoušce tahem. Faktem zůstává, že vodík, který do struktury oceli difunduje v průběhu rozkladu vody, má tendenci i velmi rychle vystupovat ven zvláště za zvýšených teplot. V tomto momentu dochází k rozporu mezi odborníky, jak rychle vodík uniká ze struktury, ale dá se s jistotou tvrdit, že čím rychleji se zkouška tahem provede, tím větší množství vodíku ve struktuře zůstává.

Vzhledem ke ztíženým podmínkám přesunem experimentu do laboratoří Fakulty elektrotechnické, se zvyšoval interval, po kterém došlo ke zkoušce tahem v laboratořích Kloknerova ústavu, kde se pro změnu nacházel stroj určený pro akreditované zkoušky tahem. I když jsou od sebe pracoviště velmi blízko (chůzí

2 minuty), tento čas, mezi vytažením lan z lázně a jejich přetržením, se dal optimalizovat na 8-13 minut u vzorků skupin A a B. Přestože tato prodleva není zcela vhodná, většina vodíku by za tento čas neměla stihnout uniknout ze struktury zkoušeného vzorku.

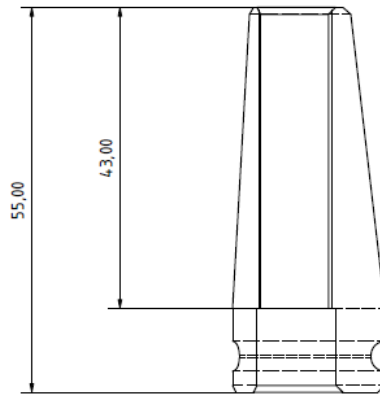
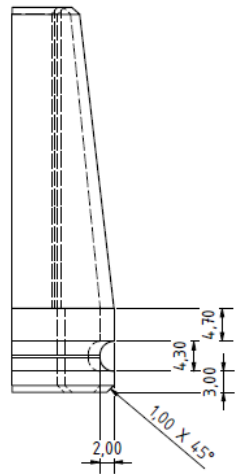
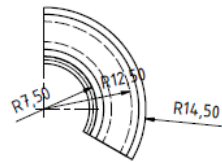


Obrázek 32: Zkušební stroj Alfred Amsler s instalovaným vzorkem

Jak bylo už výše řečeno, v laboratoři Kloknerova ústavu se nachází švýcarský stroj z roku 1929 od firmy Alfred J. Amsler s rozsahem 2500 kN na, kterém se každý týden zkouší sedmidrátové pletence do mostních konstrukcí určené pro výstavbu zejména silničních a železničních mostů podle normy ČSN EN ISO 15630-3. Na tomto stroji byla provedena i zkouška tahem exponovaných vzorků pro tuto diplomovou práci. Celý experiment má co nejdříve simulovat reálné podmínky a dodržovat postupy, které jsou platnou praxí již řady let. [48]

3.7.1. Instrumentace trhacího zařízení

Zkoušené předpínací lano se provléká do čelistí na obou stranách stroje, pomocí pák v horní části se poté sevře. Lano samotné se při vysokých silách prosmýká skrz čelisti, tudíž se musí zezadu za čelisti umístit speciálně konstruované samosvorné kuželky, které jsou k vidění na obrázku níže. Čím více lano prokluzuje v čelisti, tím více čelist tlačí na kuželku, která postupně svírá konec předpínacího lana. Tímto mechanismem je zajištěno pevné uchycení v čelistech stroje.



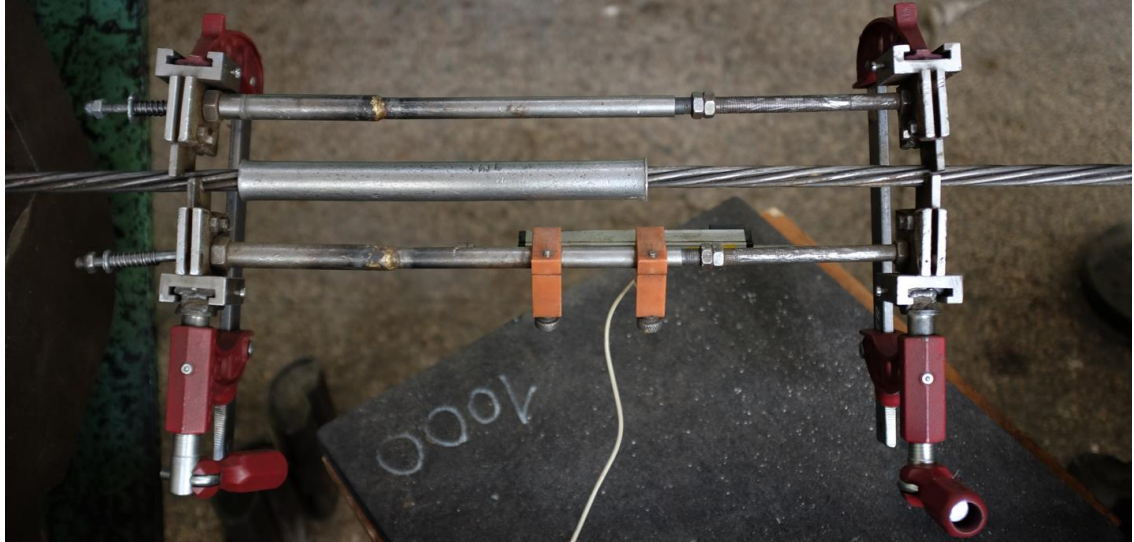
Obrázek 33: Výkres samosvorné kuželky

Další důležitou částí instrumentace celého stroje jsou čelisti s posuvným potenciometrickým snímačem, který je schopen odečítat prodloužení vzorků v řádech setin milimetru. Tato část je velmi důležitá pro zajištění informací o reálném prodloužení předpínacích lan v závislosti na zatěžovací síle, a tím i pro výpočet tažnosti, meze kluzu a modulu pružnosti.



Obrázek 34: Samosvorná kuželka a pouzdro

Nejzásadnější součástí celého stroje je hydraulický mechanismus, který vyvíjí tahové napětí. Jedná se o hydraulický válec, na který je napojen snímač, který podává informace o velikosti síly se vzorkovací frekvencí 1 Hz, tedy jednou za sekundu.



Obrázek 35: Potenciometrický snímač

3.7.2. Průběh zkoušky tahem

Po spuštění softwaru catmanEasy, do kterého jsou integrována data z posuvného potenciometrického snímače a data ze snímače hydraulického válce, začala zkouška tahem. Zatěžování probíhá podle normy ČSN EN ISO 15630-3 pro zkoušení oceli pro výztuže a předpínání, tedy v délce trvání alespoň 30 s. [48]

3.7.3. Metoda vyhodnocení

Naměřená data byla zpracována do pracovního diagramu a odvozena mez pevnosti R_m a smluvní mez kluzu $R_{p0,1}$ a $R_{p0,2}$, tažnosti A_{gt} a modul pružnosti E . Modul pružnosti byl spočten proložením přímky metodou nejmenších čtverců lineární oblastí pracovního diagramu v rozmezí 300 až 1 350 MPa.

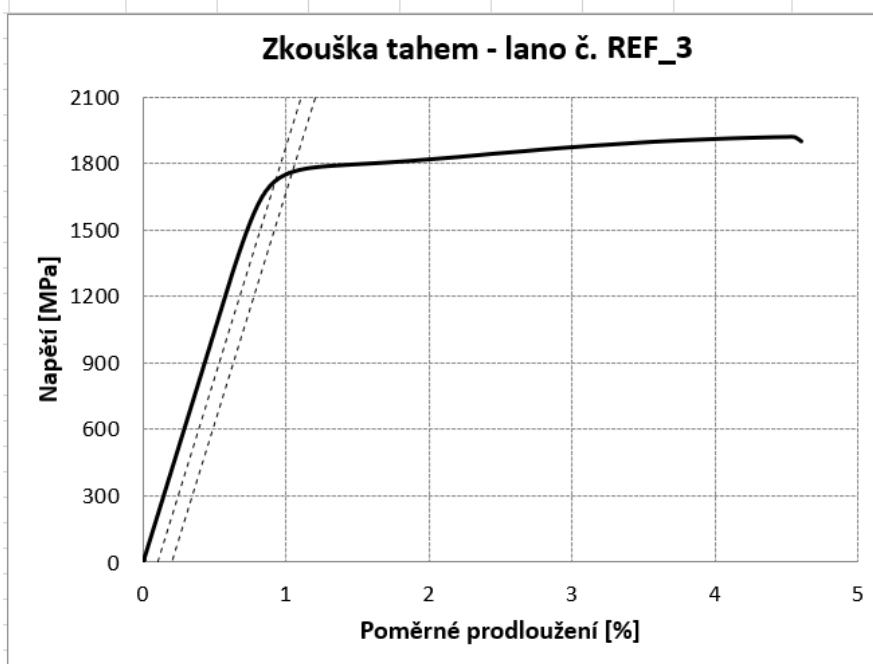
V rámci vyhodnocování byla vytvořena tabulka v programu MS Excel, která významně automatizovala práci s daty, které poskytuje software catmanEasy. Tabulka byla naprogramována tak, aby z hodnot váhy a délky a souboru dat poskytnutých ze softwaru, tedy zatěžovací síly a prodloužení na potenciometrickém snímači, dopočítala všechny zbylé charakteristiky, které byly stanoveny jako cíl vyhodnocení.

Po vnesení všech vstupních dat, tedy hmotnosti vzorku, délce vzorku, průběhu zatěžovací síly a průběhu prodloužení, program automaticky generuje tabulku s výsledky zkoušky i s přiloženým grafem.

Tabulka 4: Ukázka žlutě vložených hodnot

0,058357	0,00139	0,00139	0,3899	0,00028	0,3899	0,00028	0,00019					-208,491	-417,562
0,200459	0,00252	0,00252	1,33932	0,0005	1,33932	0,0005	0,00064		m	2109		-208,016	-417,087
0,497954	0,00628	0,00628	3,32695	0,00126	3,32695	0,00126	0,00159		l	1795		-206,447	-415,518
0,878431	0,00139	0,00139	5,86902	0,00028	5,86902	0,00028	0,00281		limit	1350		-208,491	-417,562
1,229746	0,00252	0,00252	8,21624	0,0005	8,21624	0,0005	0,00393		korekce	1		-208,016	-417,087
1,454618	0,00628	0,00628	9,71866	0,00126	9,71866	0,00126	0,00465					-206,447	-415,518
1,539979	0,01299	0,01299	10,289	0,0026	10,289	0,0026	0,00492					-203,64	-412,711
1,536628	0,02102	0,02102	10,2666	0,0042	10,2666	0,0042	0,00491					-200,28	-409,351
1,484888	0,02816	0,02816	9,92091	0,00563	9,92091	0,00563	0,00475					-197,295	-406,365
1,41345	0,03317	0,03317	9,44361	0,00663	9,44361	0,00663	0,00452					-195,2	-404,271
1,352816	0,03605	0,03605	9,0385	0,00721	9,0385	0,00721	0,00432					-193,997	-403,068
1,325675	0,03729	0,03729	8,85716	0,00746	8,85716	0,00746	0,00424					-193,478	-402,549
1,343274	0,03744	0,03744	8,97475	0,00749	8,97475	0,00749	0,00429					-193,417	-402,488
1,40121	0,03708	0,03708	9,36183	0,00742	9,36183	0,00742	0,00448					-193,568	-402,639
1,481935	0,03671	0,03671	9,90117	0,00734	9,90117	0,00734	0,00474					-193,719	-402,79
1,576665	0,03661	0,03661	10,5341	0,00732	10,5341	0,00732	0,00504					-193,764	-402,835

Vzorek	So	Fm	Rm	Rp01	Rp02	At	E	Fx
číslo	[mm ²]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[GPa]	[kN]
REF_3	149,67	287,07	1917,99	1717,65	1754,48	4,60	210,52	284,14



Obrázek 36: Snímek automaticky generované tabulky a grafu

3.8. Výsledky zkoušky tahem

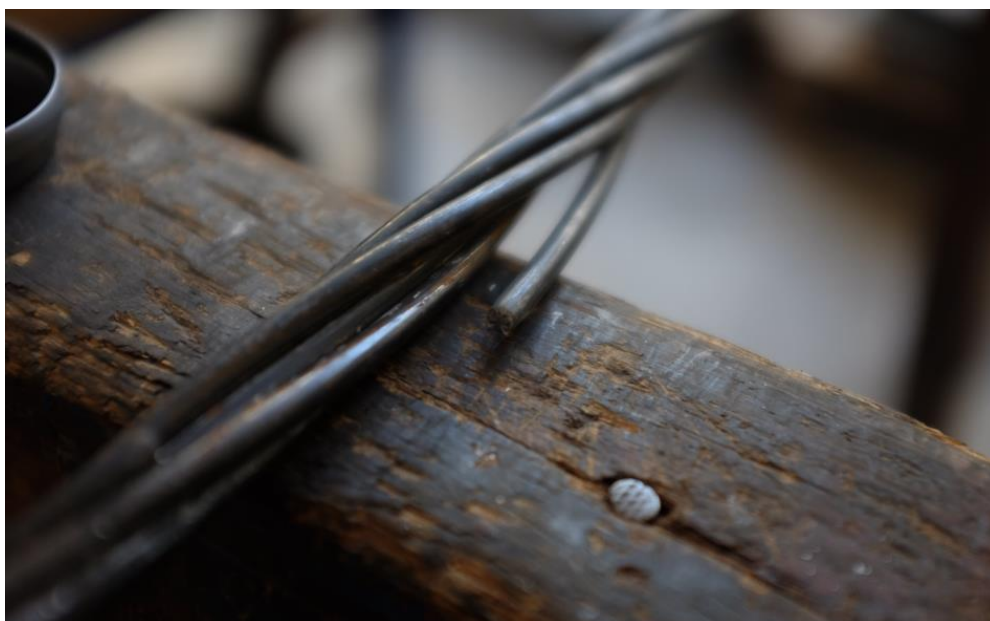
Podle výše uvedeného postupu a normy ČSN EN ISO 15630-3 bylo provedeno i vyhodnocení všech dostupných a platných výsledků. Výsledky zkoušek,

kteře se nezdařily, například špatným uchycením nebo nevyžadáním usmýknutím, nebyly vyhodnoceny a do finálních výsledků se nijak nepromítají. [48]

3.8.1. Referenční skupina

Jako první vzorky, které prošly zkouškou tahem, byly referenční vzorky bez jakéhokoliv vlivu vodíku. Referenční vzorky měly za úkol stanovit směrodatné parametry, podle kterých se budou následně srovnávat výsledky vzorků po expozici.

Vzorky předpínacích semidráťových pramenců, které byly zkoušeny jako referenční vykazovaly perfektní výsledky ve všech bodech. Podle normy mají všechny vzorky splnit mez pevnosti 1 860 MPa, 195 GPa modul pružnosti a tažnost minimálně 3,5 %. Žádný výsledek meze pevnosti nebyl menší než 1 900 MPa a tažnost byla vždy vyšší než 3,7 %, pouze jeden výsledek modulu pružnosti vyšel pod hodnotou 195 GPa, což bylo pravděpodobně způsobeno chybným upnutím čelistí.



Obrázek 37: Lom vzorku REF_5

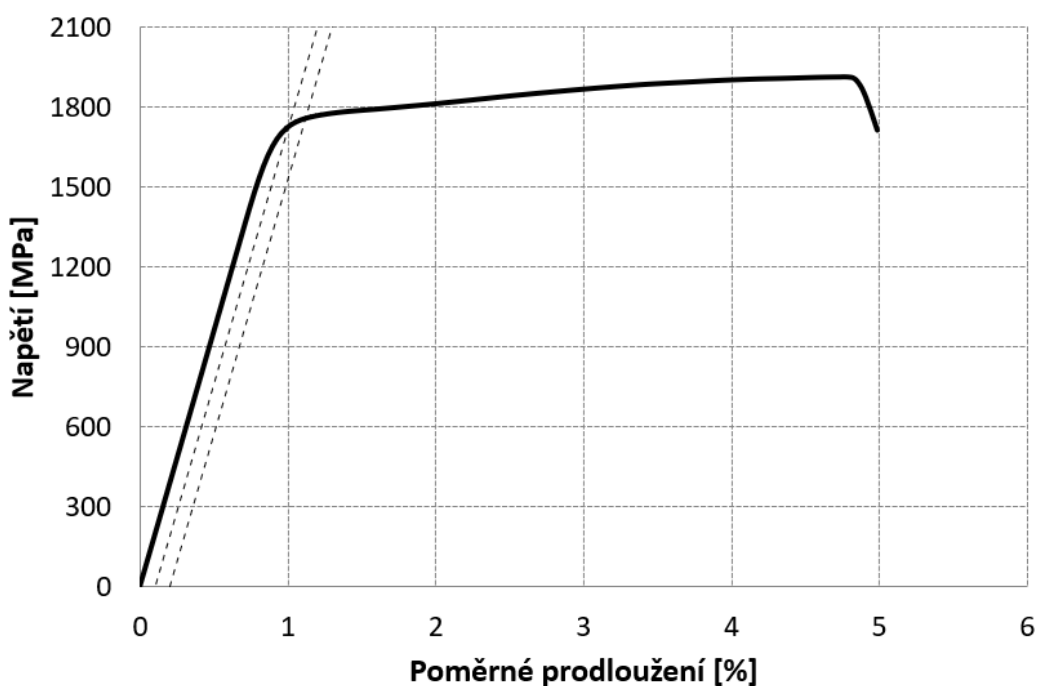
Všechny hodnoty byly vesměs podobné a vykazovaly minimální směrodatné odchylky, což je u referenčních vzorků příkladné. V tabulce níže jsou k vidění všechny měřené hodnoty, vypočtené průměrné hodnoty veličin i směrodatné odchylky všech výsledků.

Tabulka 5: Mechanické vlastnosti referenčních vzorků po zkoušce tahem

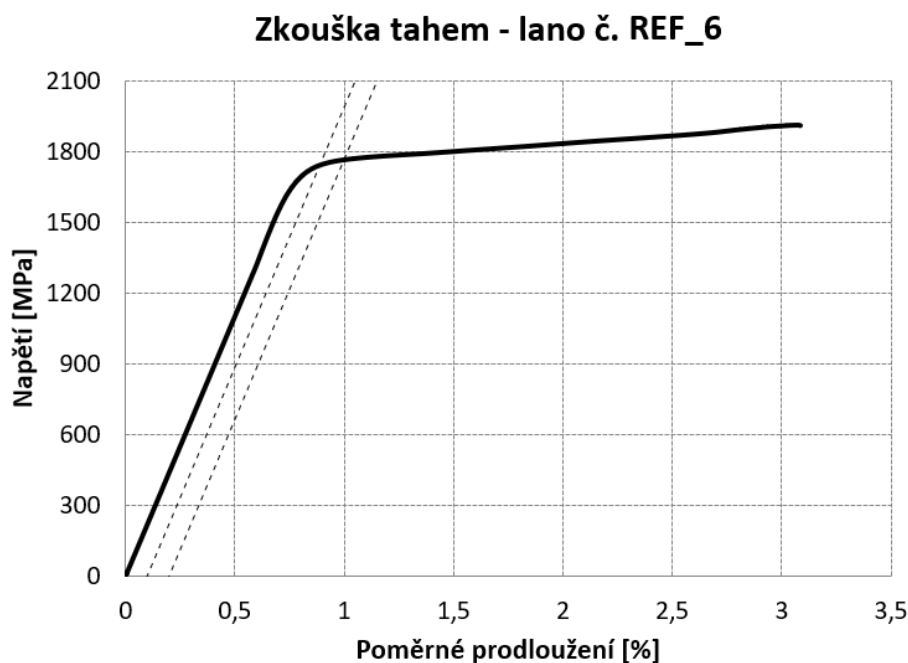
Zkouška tahem referenčních vzorků předpínacích výztuží									
Označení vzorku	Hmotnost [g]	Délka [mm]	S_0 [mm ²]	F_m [kN]	R_m [MPa]	$R_{p0,1}$ [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A [%]	E [GPa]
REF_1	2119	1807	149,55	286,95	1920,91	1738,84	1765,32	4,96	189,44
REF_2	2116	1800	149,63	286,81	1915,23	1722,54	1753,89	4,99	194,95
REF_3	2109	1795	149,51	287,07	1917,99	1717,65	1754,48	4,60	210,52
REF_4	2124	1808	149,68	285,45	1907,43	1713,55	1750,67	4,34	194,63
REF_5	2123	1809	149,89	286,78	1918,27	1725,99	1762,09	4,31	208,92
REF_6	2122	1806	149,68	286,43	1913,63	1739,12	1765,12	3,70	201,45
REF_7	2115	1799	149,76	284,95	1902,66	1704,83	1752,25	3,73	226,75
Průměr				286,28	1913,73	1723,22	1757,69	4,38	203,81
Směrodatná odchylka				0,80	6,03	11,76	5,81	0,49	11,78

Na tahovém diagramu nebyly zaznamenány žádné odchylky ani chyby. Mez kluzu je nevýrazná, proto je určena podle parametrů $R_{p0,1}$ a $R_{p0,2}$. Po lomu dochází k poklesu síly. Níže jsou uvedeny grafy dvou z referenčních tahových zkoušek pro představu o chování materiálu.

Zkouška tahem - lano č. REF_2



Obrázek 38: Tahový diagram vzorku REF_2



3.8.2. Skupina A

U vzorků po dvouhodinové expozici byl očekáván pokles mechanických vlastností, nebo alespoň změn v tažnostech, anebo chování při zkoušce tahem. Žádný z těchto předpokladů se nevyplnil, pouze u prvního předpínacího lana s označením A1, byl viditelný pokles meze pevnosti z cca 286 MPa na hodnotu 281,46 MPa. Meze kluzu $R_{p0,1}$ a $R_{p0,2}$ u vzorku A1 zůstávají podobné všem ostatním zkoušeným výztužím. Vzorky A2, A3 a A5 dosahují paradoxně ještě vyšších pevností než je tomu u referenčních vzorků, ale pouze o desetiny, maximálně jednotky kN.

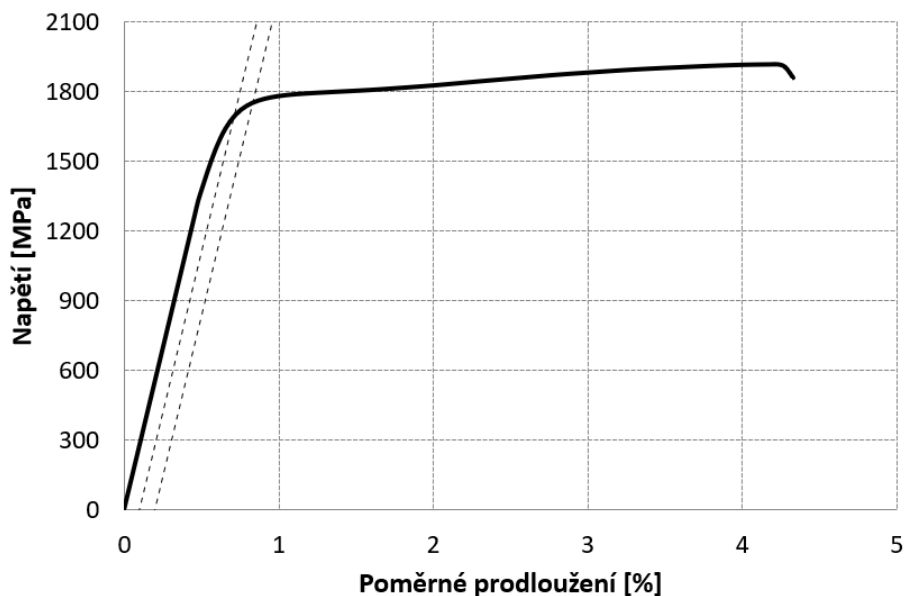
Tabulka 6: Mechanické vlastnosti vzorků po 2 hodinách expozice

Zkouška tahem vzorků po 2 hodinách expozice									
Označení vzorku	Hmotnost [g]	Délka [mm]	S_0 [mm ²]	F_m [kN]	R_m [MPa]	$R_{p0,1}$ [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A [%]	E [GPa]
A1	2116	1800	149,75	281,46	1879,47	1706,17	1735,37	3,95	169,85
A2	2117	1802	149,66	287,39	1920,3	1728,37	1763,44	4,56	209,92
A3	2118	1802	149,73	287,06	1917,23	1673,69	1751,91	4,33	294,98
A4	2110	1797	149,58	284,17	1899,81	1694,88	1744,33	3,92	218,00
A5	2117	1800	149,82	287,65	1919,96	1713,97	1756,7	5,32	198,86
A6	2132	1812	149,89	285,41	1904,16	1712,90	1758,07	4,46	211,66
A7	2122	1805	149,76	284,84	1901,99	1728,06	1760,46	4,11	162,19
Průměr				285,42	1906,13	1708,29	1752,90	4,38	209,35
Směrodatná odchylka				2,04	13,56	17,84	9,19	0,45	40,19

Faktem zůstává, že se zpravidla ze všech sedmi drátků celého pramence při lomu přetrhne pouze jeden, a to mimo střední pásmo, které bylo exponováno v roztoku

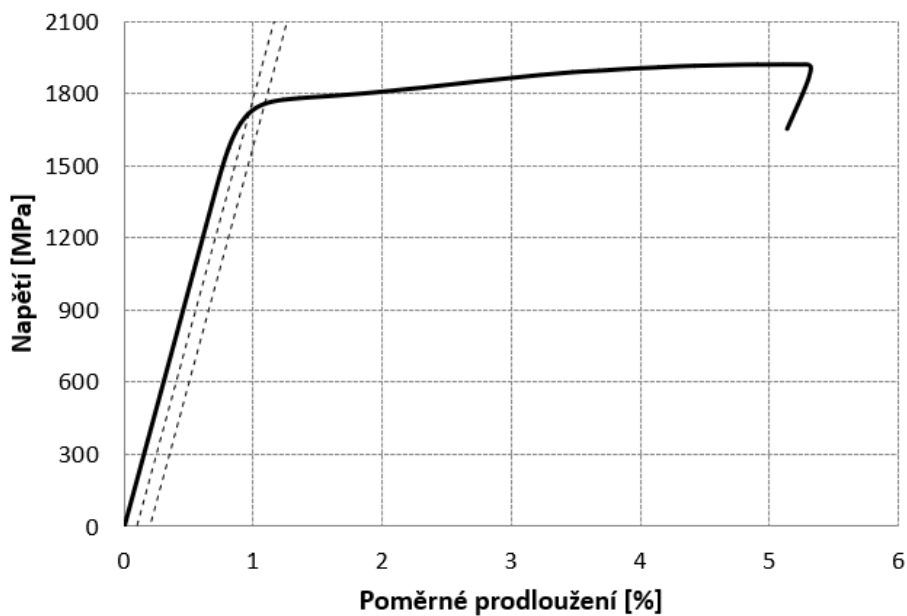
síranu sodného. Tento jev je vysvětlován tak, že je někde ve struktuře vada z výroby, která má na pevnost lana mnohem větší vliv než difundovaný vodík a má tedy větší vliv na oslabení celého lana, tudíž lano praská mimo střední pásmo, právě u takovéto vady. Tyto vady mohou být mikropóry, shluky vměstku, atd.

Zkouška tahem - lano č. A3



Obrázek 40: Tahový diagram vzorku A3 po 2 hod expoziční

Zkouška tahem - lano č. A5



Obrázek 41: Tahový diagram vzorku A5 po 2 hod expoziční

3.8.3. Skupina B

Jako skupina B byly označeny vzorky po 6 hodinách expozice. Je velmi kontroverzní, jestli takhle dlouhý expoziční čas může mít zvýšený vliv na tvorbu vodíkové křehkosti. Dá se říct, že v určitý moment nastává rovnováha mezi množstvím vodíku, který se absorbuje do struktury a množstvím vodíku, které naopak ze struktury uniká.

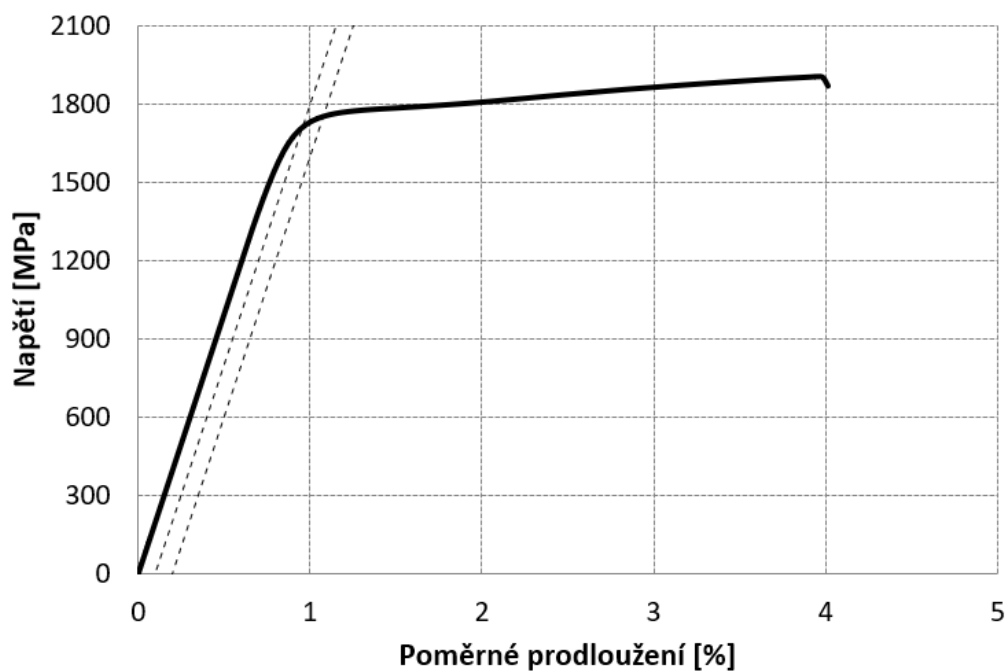
Z výsledků v tabulce níže, je patrné, že ani šestihodinová expozice nemá žádný výraznější vliv na mechanické vlastnosti zkoušených vzorků. Tedy z výsledku zkoušky tahem nelze jednoznačně tvrdit, že má přítomnost vodíku ve struktuře nějaký vliv na mechanické vlastnosti.

Tabulka 7: Mechanické vlastnosti vzorků po 6 hodinách expozice

Zkouška tahem vzorků po 6 hodinách expozice									
Označení vzorku	Hmotnost [g]	Délka [mm]	S_0 [mm ²]	F_m [kN]	R_m [MPa]	$RP_{0,2}$ [MPa]	$RP_{0,2}$ [MPa]	A [%]	E [GPa]
B1	2125	1813	149,31	284,90	1908,13	1696,32	1754,60	4,31	197,38
B2	2134	1816	149,70	285,43	1906,74	1703,55	1753,49	4,01	204,04
B3	2123	1803	150,00	286,48	1909,89	1714,84	1751,51	4,20	195,58
B4	2114	1799	149,69	287,45	1920,27	1710,83	1754,47	4,70	210,78
B5	2124	1806	149,82	287,22	1917,13	1703,07	1755,22	4,11	219,13
B6	2115	1800	149,93	286,45	1910,87	1704,43	1752,55	4,01	206,27
B7	2130	1814	149,54	284,11	1904,98	1701,99	1746,93	4,12	208,21
			Průměr	286,01	1911,14	1705,00	1752,68	4,21	205,91
			Směrodatná odchylka	1,14	5,17	5,62	2,63	0,22	7,43

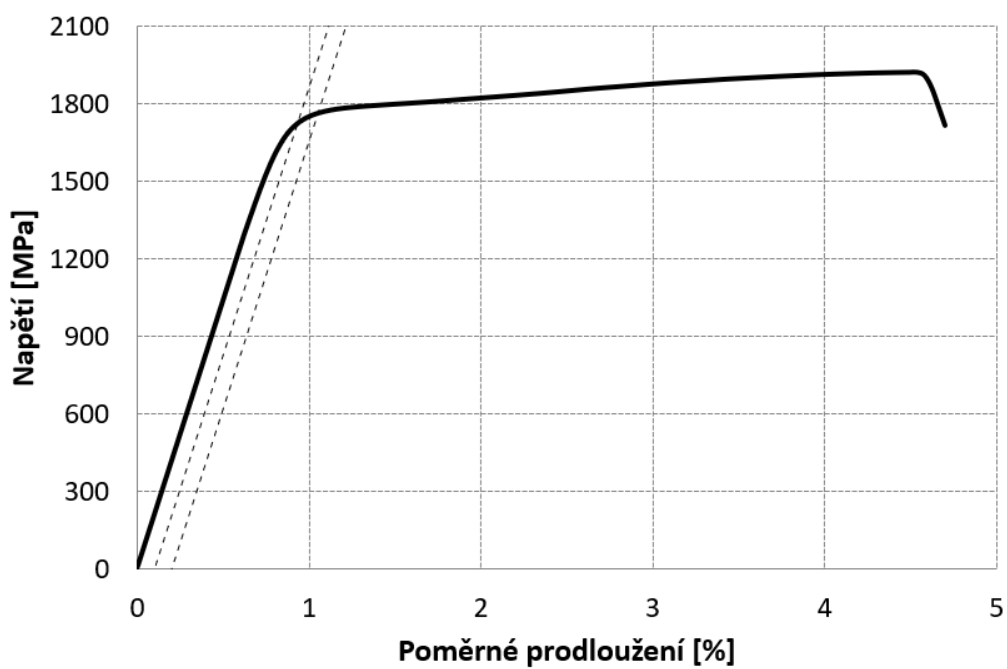
Stejně jako u referenčních vzorků a vzorků A i tyto lana praskají mimo střední exponované pásmo, tedy kvůli nějaké z vnitřních vad pravděpodobně z výroby.

Zkouška tahem - lano č. B2



Obrázek 42: Tahový diagram vzorku B2 po 6 hod expozici

Zkouška tahem - lano č. B4



Obrázek 43: Tahový diagram vzorku B4 po 6 hod expozici

3.8.4. Skupina C

Po ukončení tahových zkoušek na skupinách A a B bylo po konzultaci smluveno, že bude experiment pokračovat v pozmeněném režimu. Hlavní myšlenkou změny bylo snížit čas mezi koncem expozice a tahovou zkouškou, na co možná nejkratší čas z důvodu rychlého unikání vodíku ze struktury. Vzhledem k tomu, že vzorky předpínacích lan neobsahují téměř žádné vnitřní vady a nejsou exponovány pod napětím, jedná se dozajista o vratný proces difuze vodíku. Dle výzkumu kolegů z VŠCHT může být pokles vodíku ve struktuře mezi druhou a desátou minutou po ukončení expozice až o 35 %. [45]



Obrázek 44: Krystalizace síranu sodného na vzorku po expozici

Po převezení veškeré aparatury přímo ke zkušebnímu stroji Amsler byla doba mezi koncem expozice a začátkem tahové zkoušky snížena na 120 sekund. Tato doba by měla být dostatečně krátká na to, aby většina vodíku zůstala ve struktuře i přesto, že se jedná o vratnou vodíkovou křehkost.

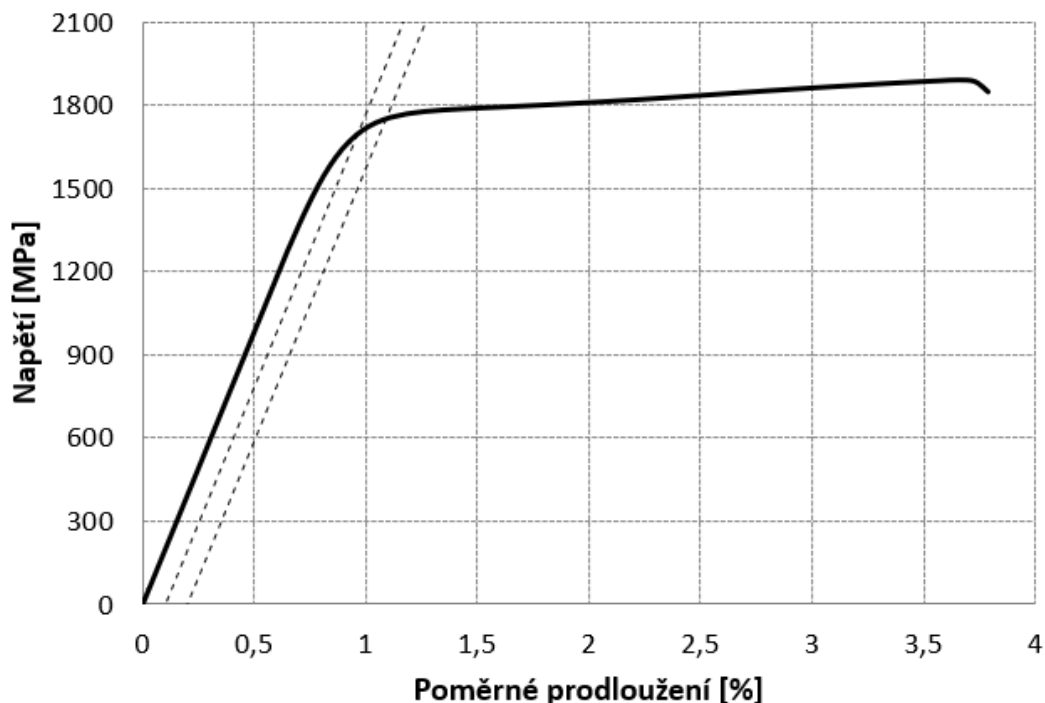
Tabulka 8: Mechanické vlastnosti vzorků skupiny C

Vzorky po 2 hodinách expozice a tahovou zkouškou do 2 minut po vytažení									
Označení vzorku	Hmotnost [g]	Délka [mm]	S_0 [mm ²]	F_m [kN]	R_m [MPa]	$R_{p0,1}$ [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A [%]	E [GPa]
C1	2110	1795	149,70	283,98	1896,17	1665,77	1728,10	4,92	228,21
C2	2117	1802	149,81	284,95	1902,63	1701,17	1751,05	4,27	211,01
C3	2114	1799	149,76	287,17	1917,47	1701,96	1757,82	4,08	206,35
C4	2112	1797	149,77	283,21	1891,02	1668,50	1737,11	3,79	198,19
C5	2121	1804	149,73	283,93	1895,85	1663,64	1733,34	4,44	201,42
Průměr				284,65	1900,63	1680,21	1741,49	4,30	209,04
Směrodatná odchylka				1,38	9,19	17,51	11,16	0,38	10,53

Ani výsledky skupiny C nemohou potvrdit přítomnost vodíkového křehnutí v oceli předpínací výztuže. U třech vzorků byla síla na mezi kluzu snížena pod 284 kN, což je o 2-3 kN méně než u vzorků předchozích skupin, ale jedná se pouze o pokles o 0,8 %, což se nedá brát jako uspokojivý výsledek. Nutno podotknout, že se lomy vzorků nacházely opět mimo exponované pásmo.

V rámci skupiny C byly zkoušce tahem podrobeny další dvě referenční lana, kvůli podezření na nepřesnou kalibraci siloměru. Obě lana ovšem vykazovaly stejné hodnoty jako referenční skupina na začátku experimentu. Tímto byla ověřena integrita a návaznost experimentu.

Zkouška tahem - lano č. C4



Obrázek 45: Tahový diagram vzorku C4

Na tahovém diagramu vzorku C4 není patrná žádná změna oproti průběhu skupiny referenční. Jediný rozdíl je pokles síly na mezi pevnosti na 283,21 kN. I přes menší pokles vzorek splňuje všechny požadavky na mechanické vlastnosti stanovené normou.

Kvůli nedostatku dalších vzorků předpínacích lan a časovému tlaku bylo z důvodu nevypovídajících výsledků skupiny C vyzkoušeno pouze 5 lan. Větší důraz byl kladen na poslední část, skupinu D.

3.8.5. Skupina D

Vzhledem k výsledkům skupiny C, které stále úplně neprokázaly příspěvek vodíkové křehkosti, se přistoupilo k poslední možné změně experimentu. Bylo rozhodnuto,

že se bude tahová zkouška provádět přímo v průběhu expozice. Jedná se o změnu, kdy bude vzorek předpínací výztuže usazen v boxu a připojen ke zdroji, kde probíhá exponování vodíkem a zároveň upnut v trhacím stroji.



Obrázek 46: Tahová zkouška přímo při expozici

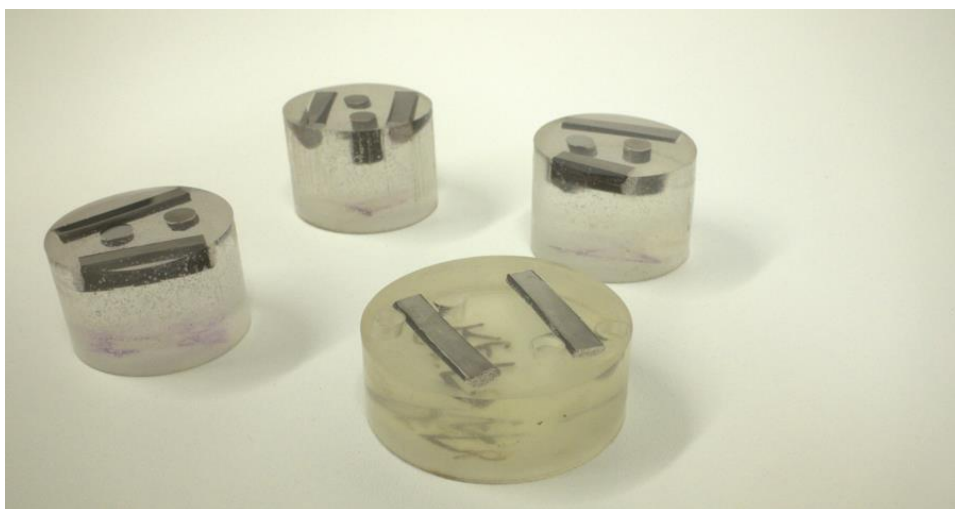
Doba, po které bude spuštěna tahová zkouška, byla stanovena na 2 hodiny po zahájení expozice. Nevýhodou této varianty je pravděpodobné zničení boxů, ve kterých probíhá expozice, při tahové zkoušce. Druhou nevýhodou je nemožnost nasazení potenciometrického snímače prodloužení. Z tohoto důvodu není možné vyhodnotit tažnost, modul pružnosti ani mez kluzu. Hodnoty, které nabízí experiment pro skupinu D jsou pouze síla a napětí na mezi pevnosti.

Tabulka 9: Mechanické vlastnosti vzorků skupiny D

Tahová zkouška přímo při expozici									
Označení vzorku	Hmotnost [g]	Délka [mm]	S_0 [mm ²]	F_m [kN]	R_m [MPa]	$R_{p0,1}$ [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A [%]	E [GPa]
D1	2135	1810	149,71	283,59	1893,59	0,00	0,00	0,00	0,00
D2	2117	1802	149,79	286,53	1913,23	0,00	0,00	0,00	0,00
D3	2120	1804	149,70	286,90	1915,65	0,00	0,00	0,00	0,00
D4	2110	1796	149,87	286,60	1913,68	0,00	0,00	0,00	0,00
D5	2126	1805	149,81	285,98	1910,74	0,00	0,00	0,00	0,00
D6	2139	1812	149,75	287,03	1916,64	0,00	0,00	0,00	0,00
D7	2127	1807	149,72	286,65	1913,77	0,00	0,00	0,00	0,00
Průměr				286,18	1911,04	0,00	0,00	0,00	0,00
Směrodatná odchylka				1,10	7,33	0,00	0,00	0,00	0,00

3.9. Metalografická analýza vzorků

Dalším z cílů praktické části bylo metalografické zkoumání referenčních i exponovaných vzorků. Po zkoušce tahem byla přetržená lana nařezána, zalita do epoxidové pryskyřice a postupně broušena různými druhy brusných papíru o zrnitostech od P120 do P1500. Závěrem byly vzorky doleštěny diamantovou suspenzí, a tak připraveny ke zkoumání čistoty struktury pod mikroskopem. Ve vzorcích nebyly objeveny žádné významnější nečistoty ani defekty u všech ze zkoumaných vzorků.



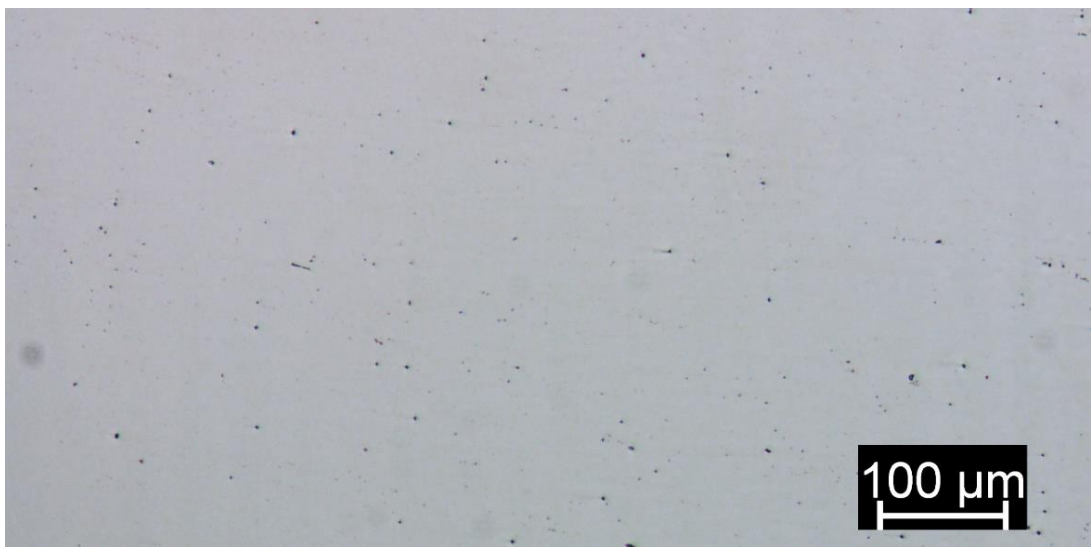
Obrázek 47: Vzorky předpínací výztuže zalité v pryskyřici

Po dokončení snímání mikročistoty se vzorky vrátily do laboratoře a bylo nutné jejich naleptání. Jako leptadlo byl použit 5 % Nital. Leptání probíhalo v řádech sekund a bylo velmi složité zjistit, kdy je vzorek správně připraven, proto byly vzorky následně přešetřovány. V následujících kapitolách jsou výsledné snímky zkoumaných skupin.



Obrázek 48: Mikročistota v podélném směru

Na snímku v podélném směru jsou patrné náznaky protažení způsobené tvářením materiálu při výrobním procesu. Struktura je bez výraznějších nečistot a vměstků.



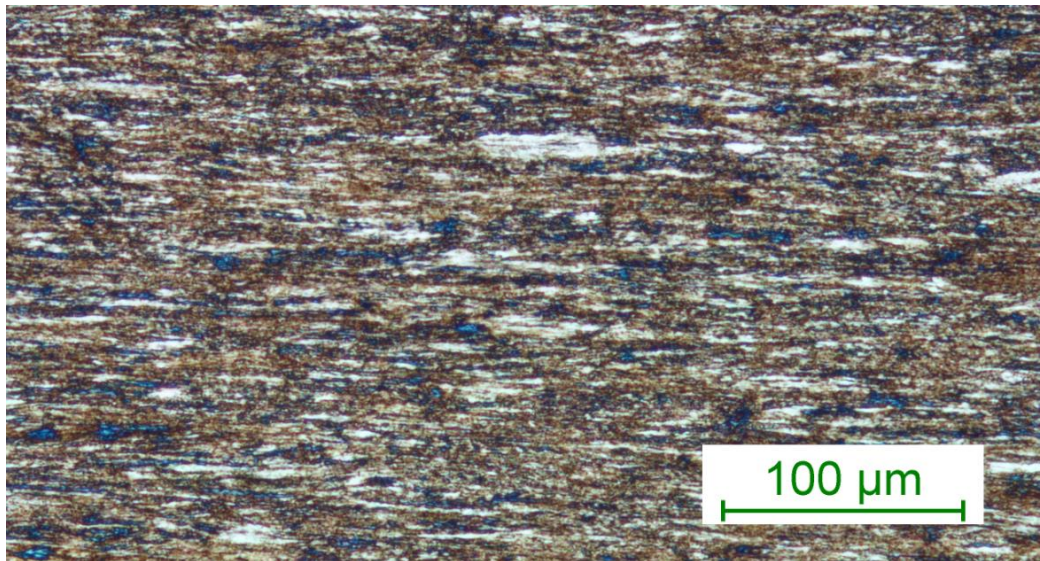
Obrázek 49: Mikročistota v příčném směru

Na snímku pořízeném z příčného řezu vzorku není vidět žádné protažení oproti snímku pořízeného z podélného řezu výše.

3.9.1. Referenční skupina bez zkoušky tahem

První metalografický výbrus, který byl vyhotoven obsahoval nařezané části předpínací výztuže bez jakéhokoliv ovlivnění a bez zkoušky tahem, aby snímky

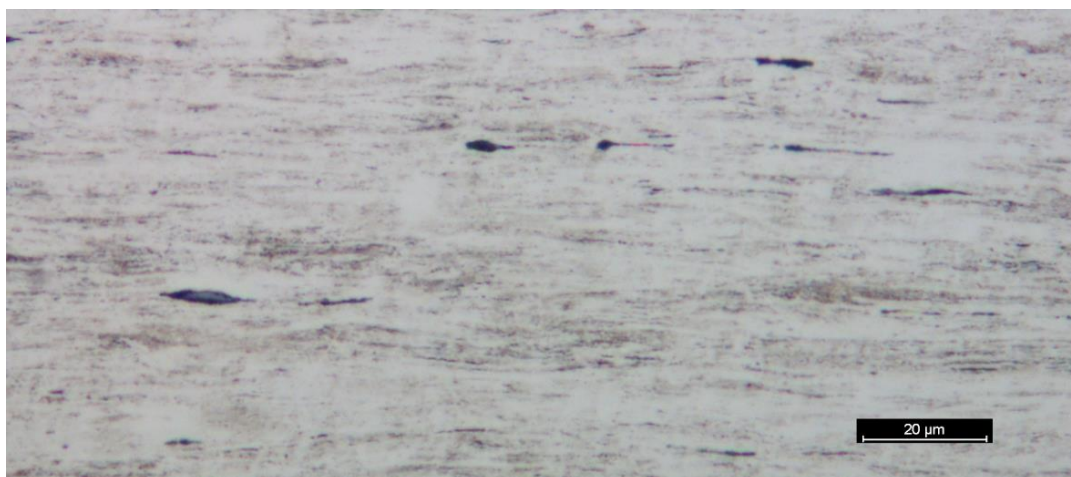
nebyly zkresleny protažením zrn a případnými trhlinami. I přesto je vidět protažení zrn způsobené výrobními procesy tváření. Protažení je znatelně menší než po tahové zkoušce.



Obrázek 50: Leptaný vzorek bez zkoušky tahem

3.9.2. Referenční skupina po zkoušce tahem

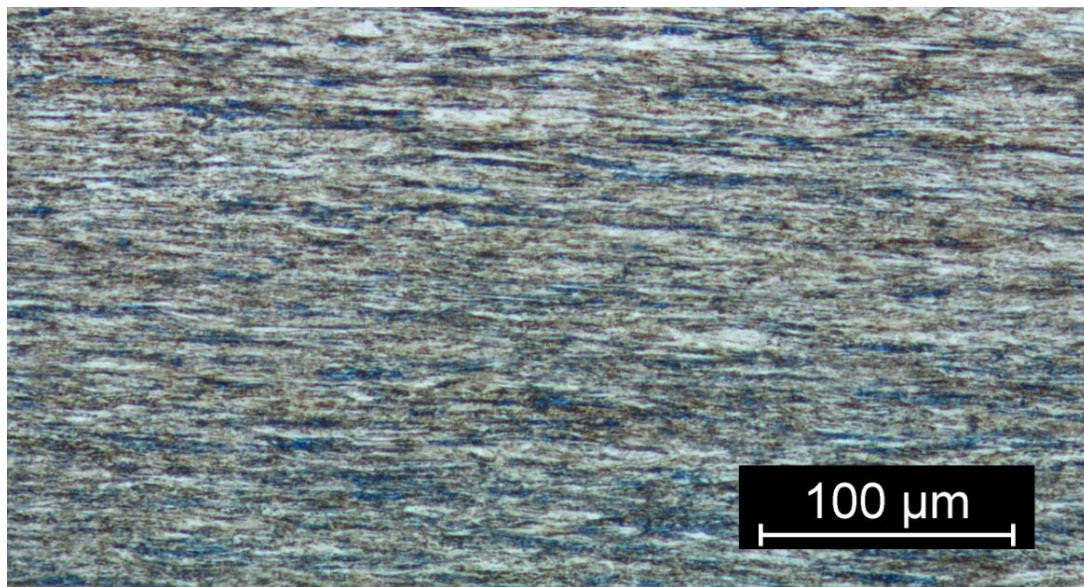
O poznání zajímavější byly snímky z metalografického výbrusu referenčních vzorků předpínacích výztuží po zkoušce tahem. Zde bylo jasně viditelné protažení zrn způsobené zkouškou tahem. Mimo tento jev se snímky zdály být v podstatě totožné bez jiných viditelných změn. Na snímku je vidět, že vzorky byly leptány výrazně kratší dobu.



Obrázek 51: Protažení zrn ve směru tahové zkoušky

3.9.3. Skupina A

Metalografický výbrus skupiny A obsahoval části vzorků, které byly dvě hodiny exponované ve vodném roztoku síranu sodného za vzniku atomárního vodíku, tudíž bylo předpokládáno, že by mohly být viditelné alespoň minimální změny.



Obrázek 52: Struktura vzorku A7

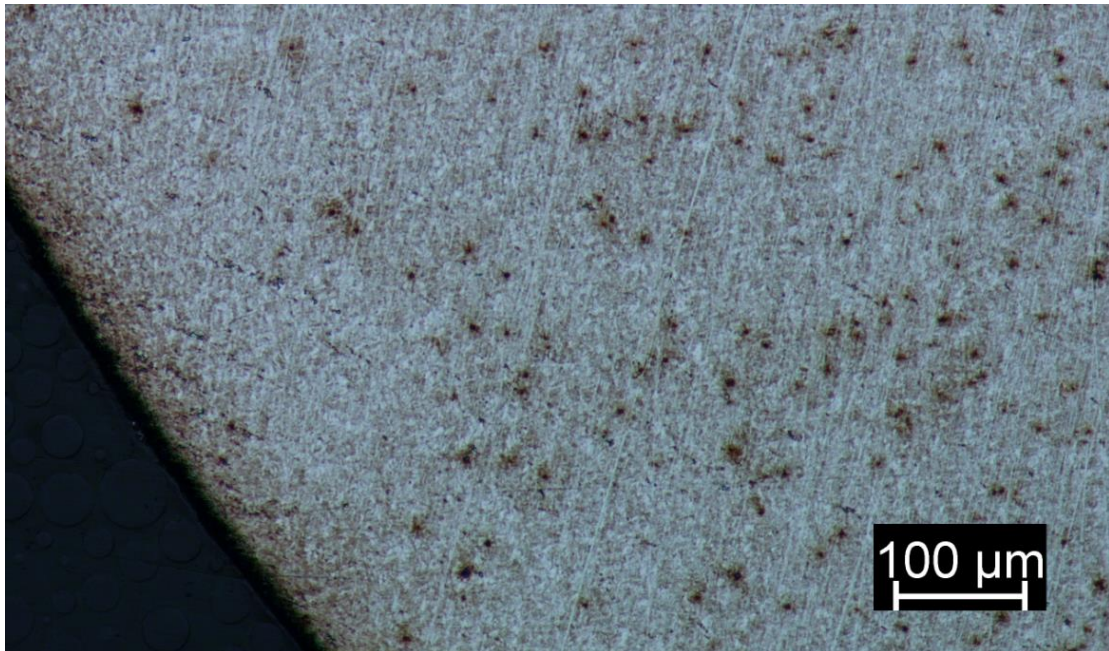
Ve struktuře nejsou patrné žádné náznaky trhlin ani póru, které by mohl iniciovat vodík. Na optickém mikroskopu není patrný žádný rozdíl od struktury referenčních vzorků.

3.9.4. Skupina B

Ani výbrusy skupiny B, která byla exponována po dobu 6 hodin nevykazují žádné stopy po ovlivnění vodíkem. Struktura je shodná s referenčními vzorky. Viditelné je pouze protažení zrn a jemnozrnná struktura oceli.



Obrázek 53: Podélný řez strukturou vzorku B5

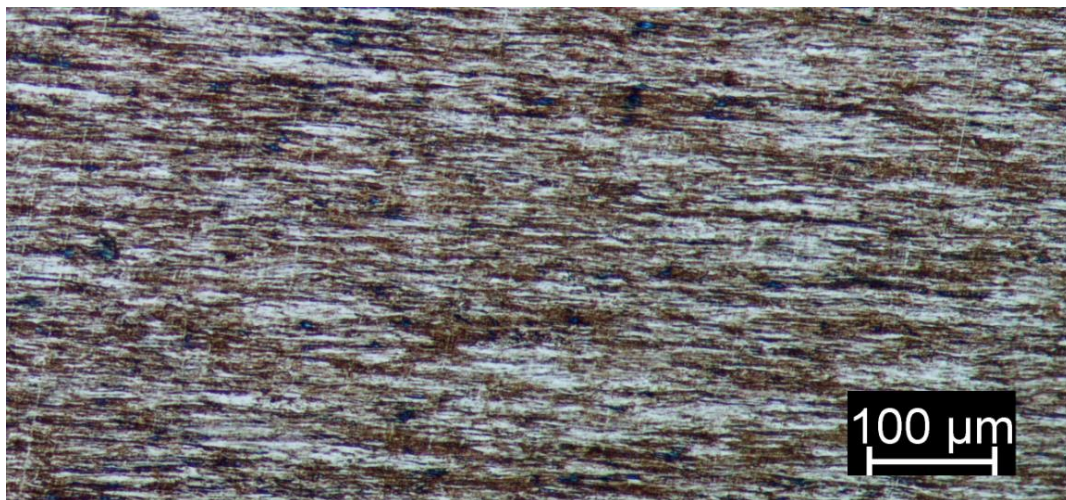


Obrázek 54: Snímek z příčného řezu vzorku B3

3.9.5. Skupina C a D

Skupiny C a D byly sjednoceny z důvodu totožnosti struktury jako u skupin A a B. Na snímku níže je viditelná struktura a protažení zrn jako u všech zbylých vzorků. Ze zkoumání vzorků všech skupin nebyly patrné žádné změny ani v jedné ze skupin. Rozlišovací schopnosti optického mikroskopu jsou v tomto případě na hraně využitelnosti. K fraktografické analýze v kapitolách byl proto dále využit

elektronový mikroskop, kde jsou fotony nahrazeny elektrony, a tím je dosaženo výrazně větších přiblížení.



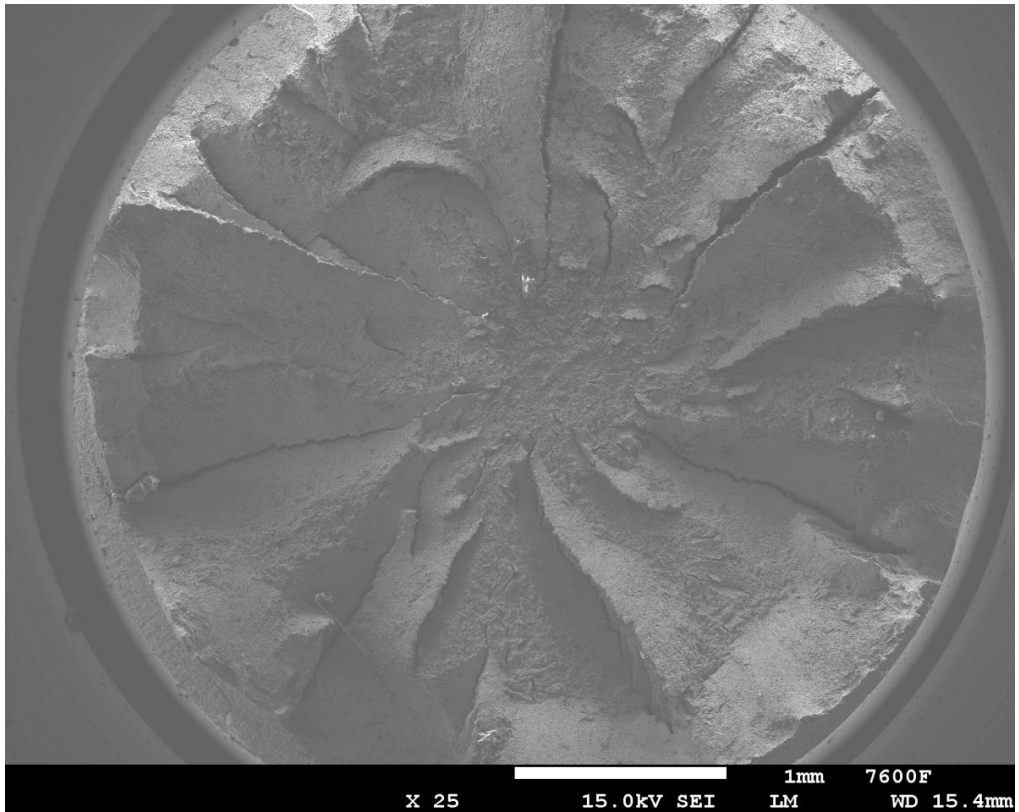
Obrázek 55: Struktura vzorku D2

3.10. Analýza lomových ploch

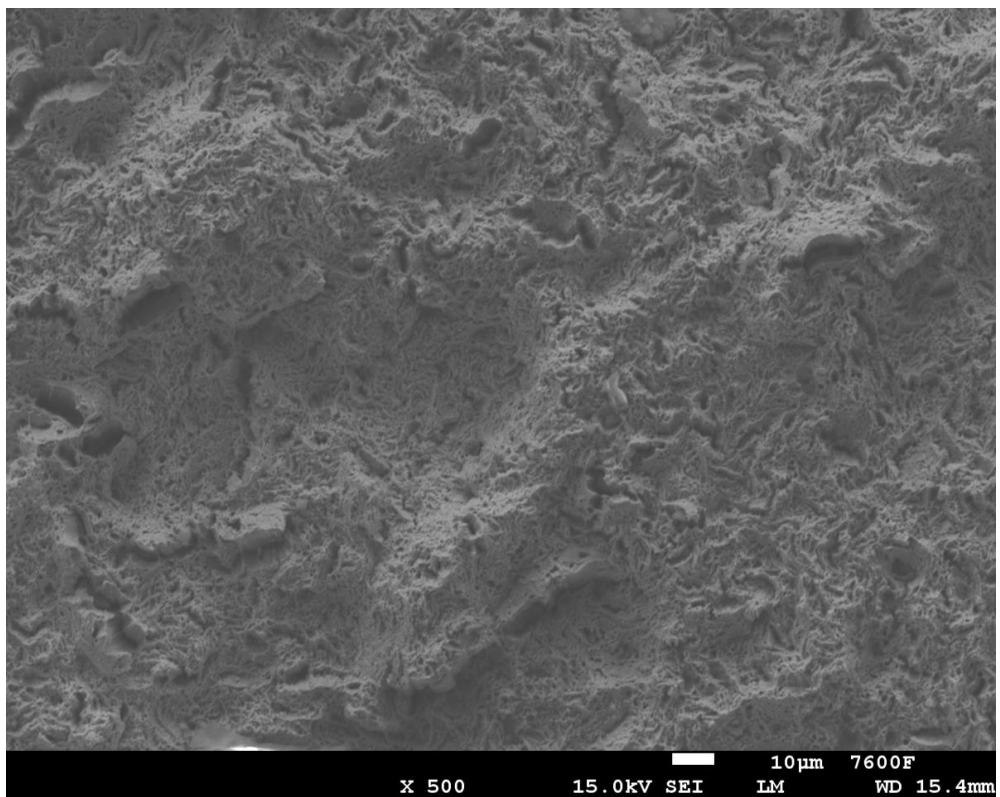
Po tahové zkoušce byly ze vzorku předpínacích lan odříznuty jednotlivé dráty, které byly přetrženy. Zpravidla se jednalo o jeden, maximálně dva dráty ze sedmi na každém vzorku. U žádného vzorku nedošlo k přetržení všech sedmi drátů celého pletence. Tyto dráty byly následně očištěny acetonem od nečistot a podrobeny analýze lomových ploch na elektronovém mikroskopu.

3.10.1. Referenční skupina

Na obrázcích níže jsou fotky z elektronového mikroskopu referenčních vzorků. Na snímcích jsou vidět tzv. frézovité lomy, což je význačné pro tvářené materiály o vysokých pevnostech jako jsou právě předpínací sedmidrátové pletence. Jedná se o tvárné lomy bez viditelných shluků precipitátů nebo nečistot.

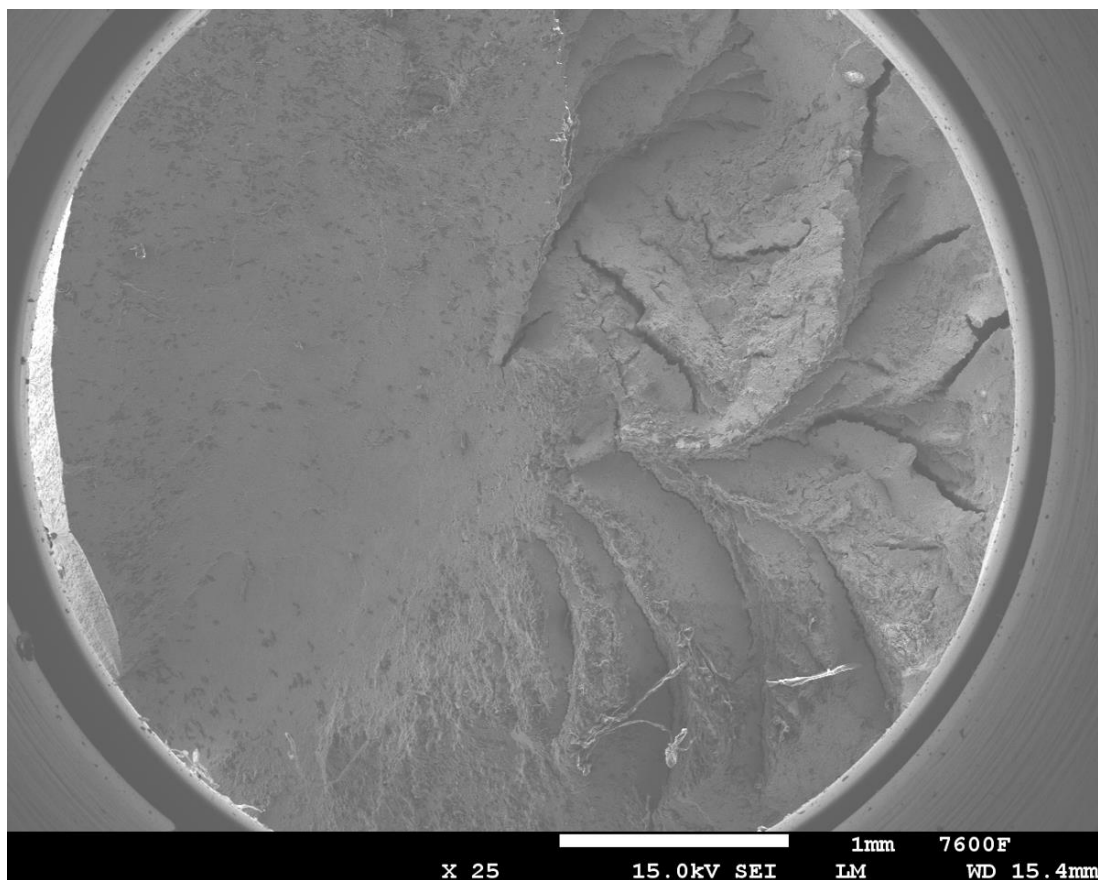


Obrázek 56: Lomová plocha vzorku REF_3, frézovitý lom



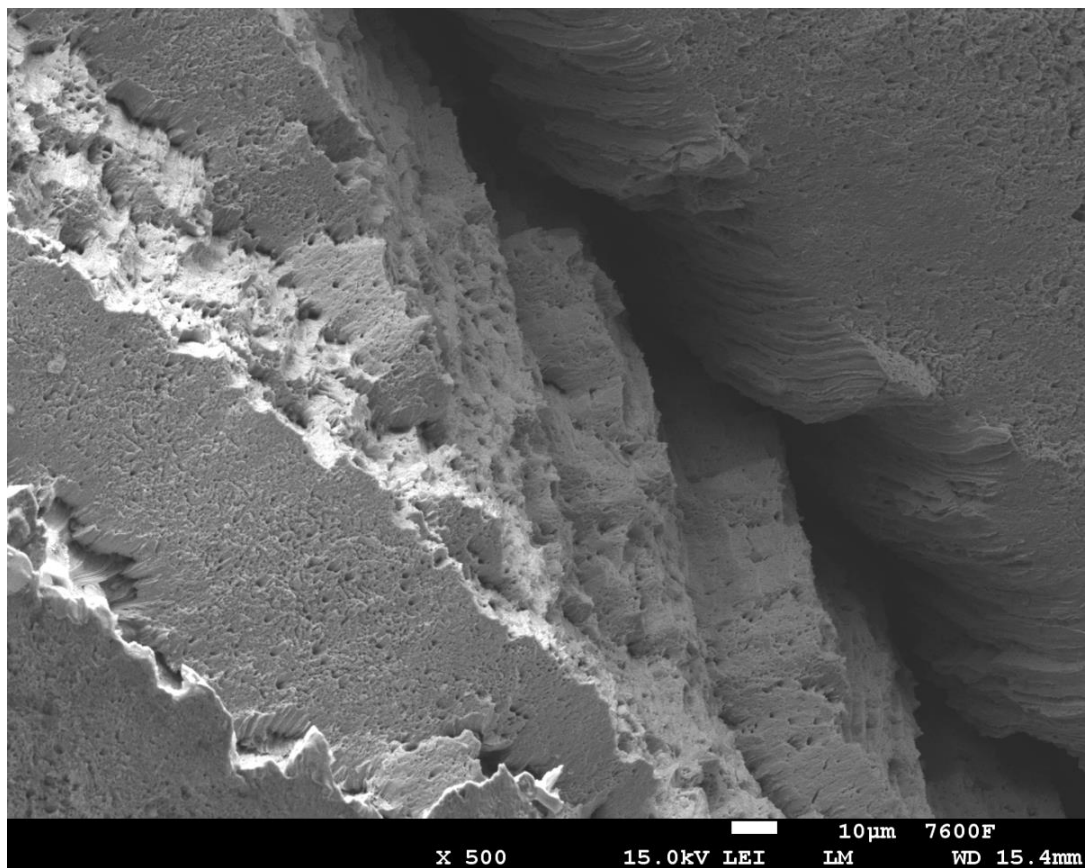
Obrázek 57: Struktura lomové plochy REF_3, tvárný lom

Na snímcích lomových ploch vzorku REF_3 je jasně patrný čistý frézovitý lom. Na obrázku se 500x zvětšením je zřejmé, že se jedná o tvárný lom, který neprochází po hranicích zrn.



Obrázek 58: Lomová plocha vzorku REF_5

Lomová plocha vzorku REF_5 je kombinovaná. Jedná se o částečně smykový lom spolu s lomem frézovitým. Na snímku níže je detail sekundární trhliny, který vykazuje tvárné chování. Po obvodu drátu je patrný krček.

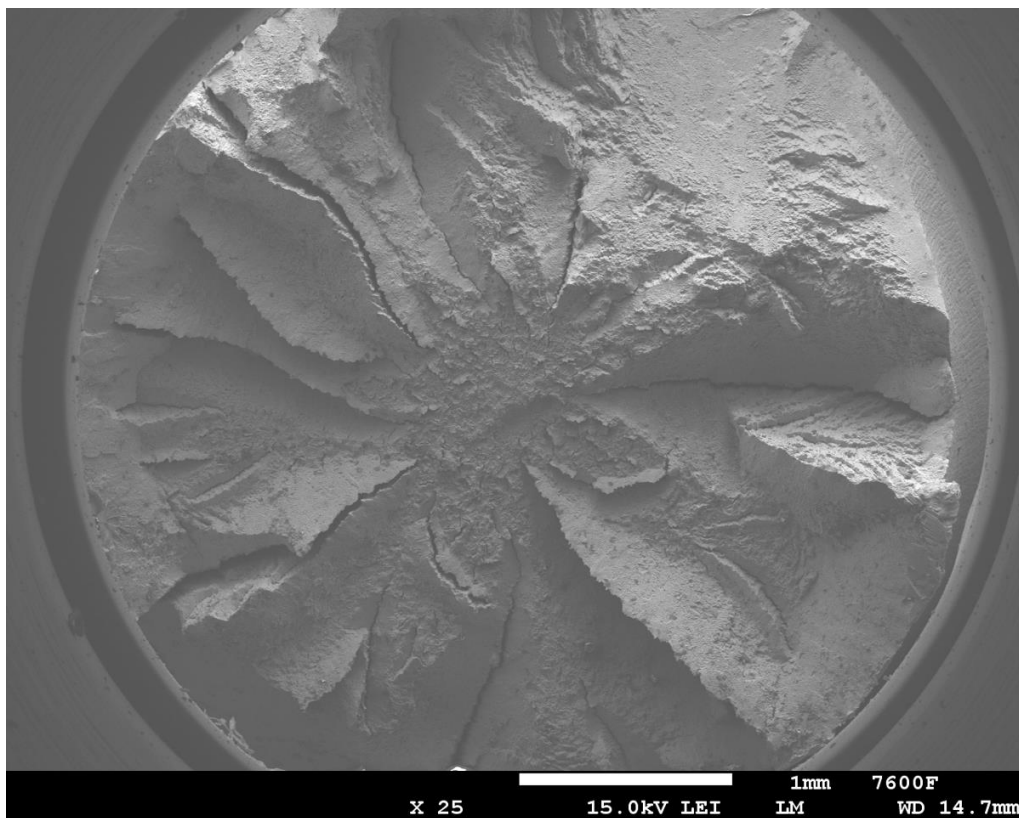


Obrázek 59: Detail trhliny frézovitého lomu vzorku REF_5

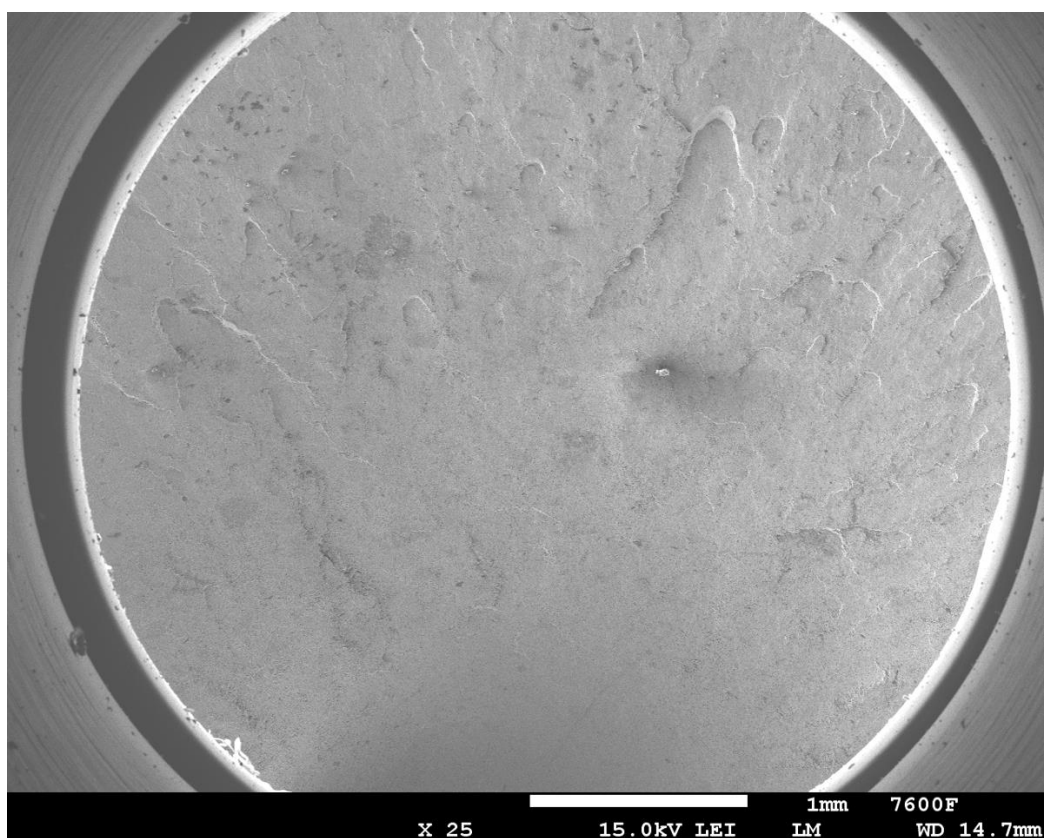
3.10.2. Skupina A

Všechny vzorky skupiny A vykazovaly při zkoušce tahem obdobné chování jako referenční vzorky, tudíž bylo očekáváno, že ani na lomových plochách nebude patrné vodíkové křehnutí.

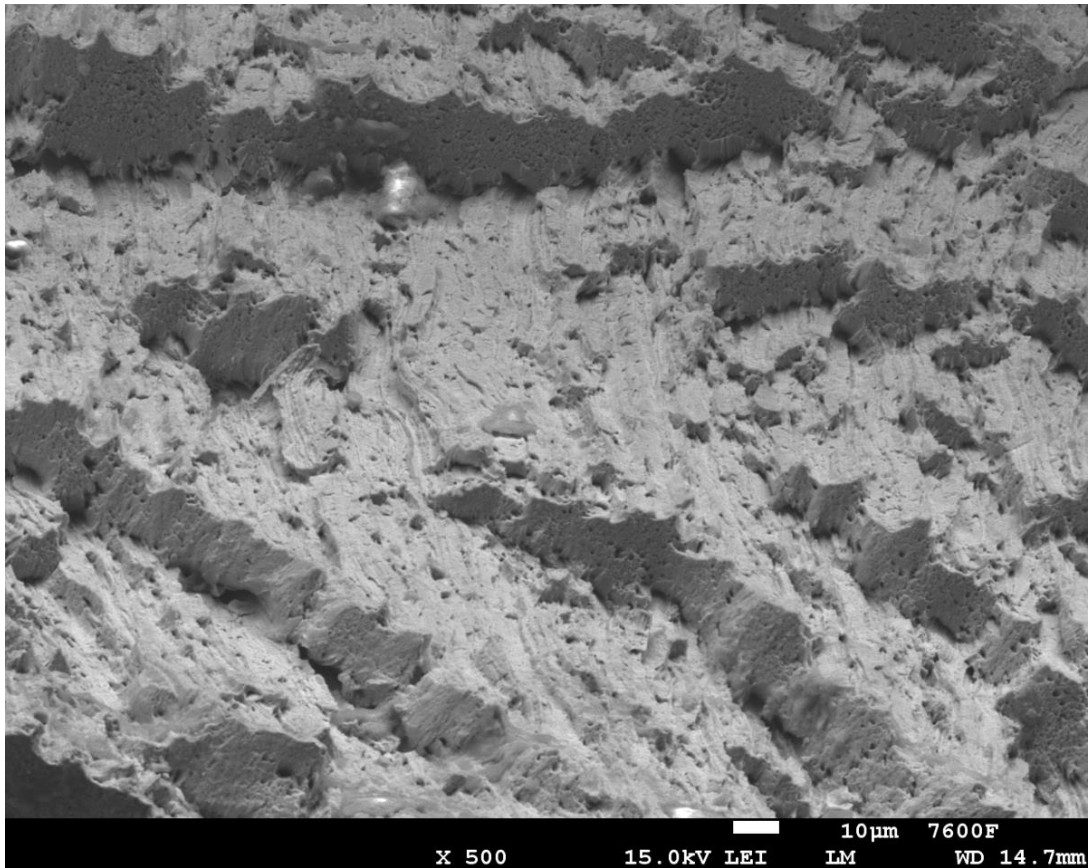
Tato skutečnost se potvrdila na plochách vzorků A2 a A5, které jsou totožné s plochami referenčními. U všech vzorků byla patrná tvorba krčku. Ze snímků z elektronového mikroskopu nelze potvrdit lomové chování způsobené vodíkovou křehkostí.



Obrázek 60: Lomová plocha vzorku A2



Obrázek 61: Lomová plocha vzorku A5

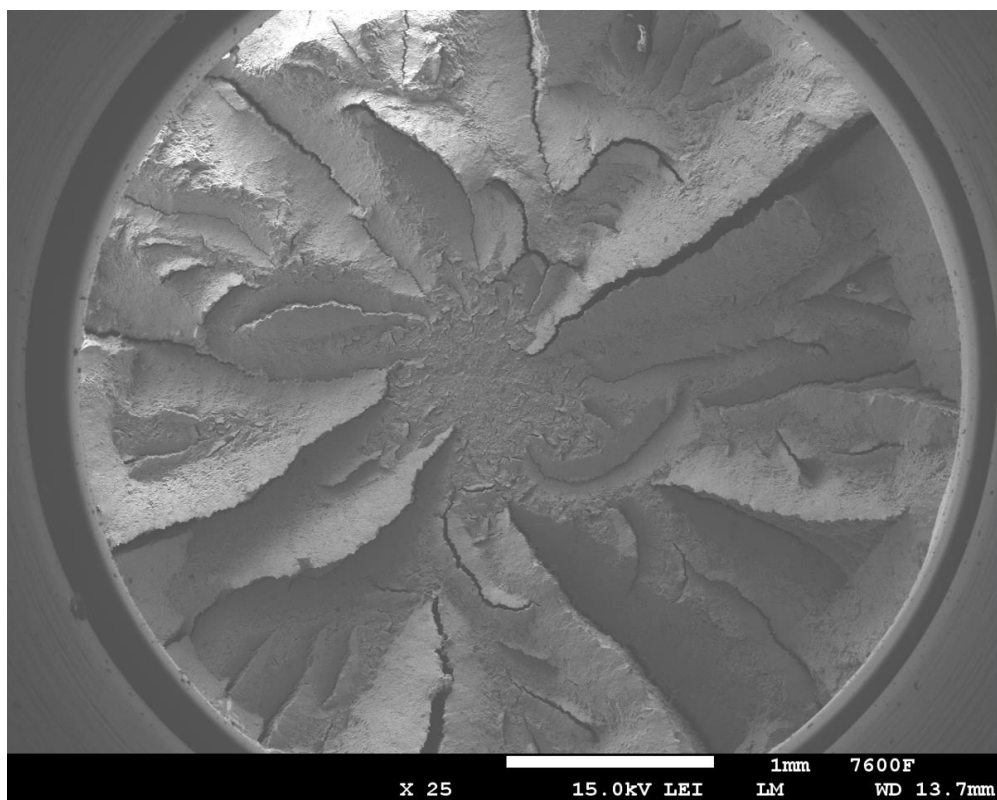


Obrázek 62: Struktura lomu vzorku A5

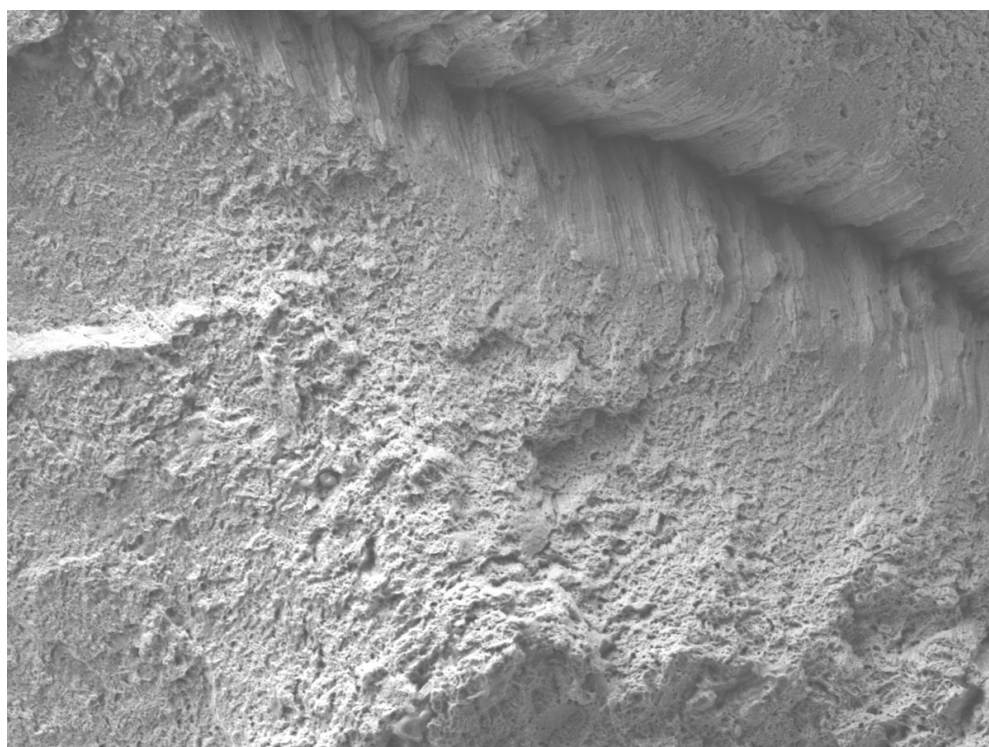
Lomová plocha vzorku A5 je čistě smyková. Tento jev se objevuje i u referenčních vzorků bez vlivu vodíku, ale ve velmi malé míře. Pevnostní charakteristiky vzorků s těmito lomy jsou totožné se vzorky s frézovitými lomy.

3.10.3. Skupina B

Povaha lomových ploch vzorků skupiny B, tedy po 6 hodinách expozice nevykazuje žádné známky vodíkového křehnutí. Lomy jsou tvárné procházející skrze zrna. Většina lomů je frézovitého charakteru, u jednoho vzorku byl zaznamenán smykový lom. Nebyly patrné mezikrystalové trhliny ani známky křehkých lomů. Tvorba krčku byla obdobná jako u referenční skupiny.



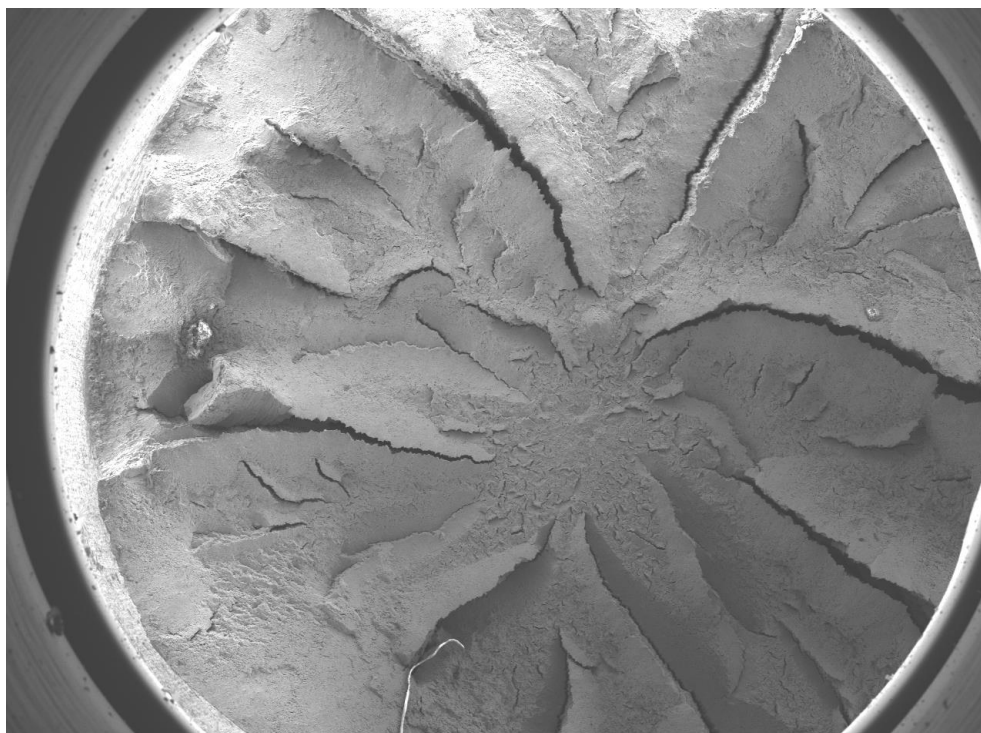
Obrázek 63: Lomová plocha vzorku B1



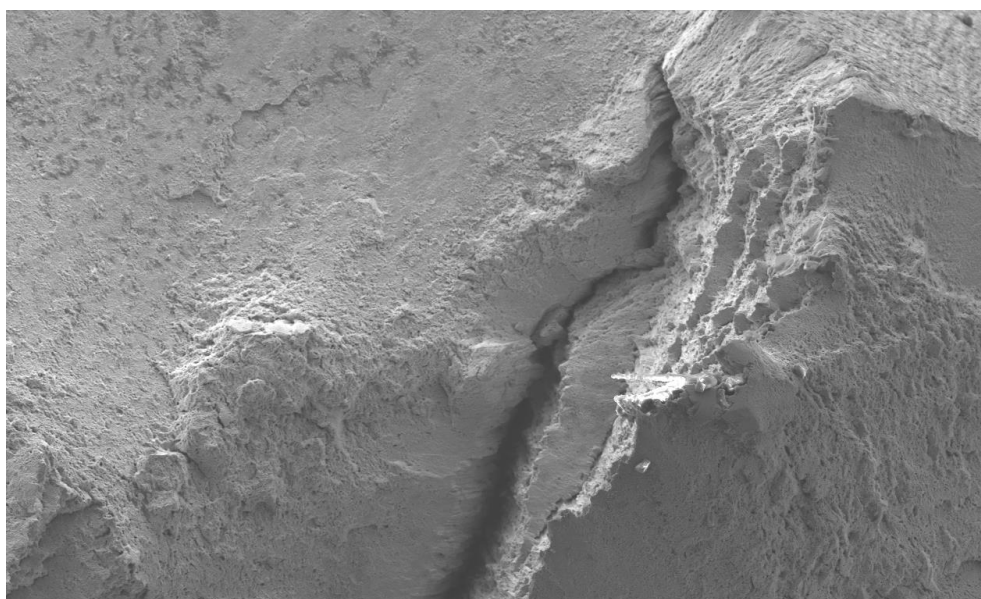
Obrázek 64: Detail trhliny na lomové ploše vzorku B1

3.10.4. Skupina C

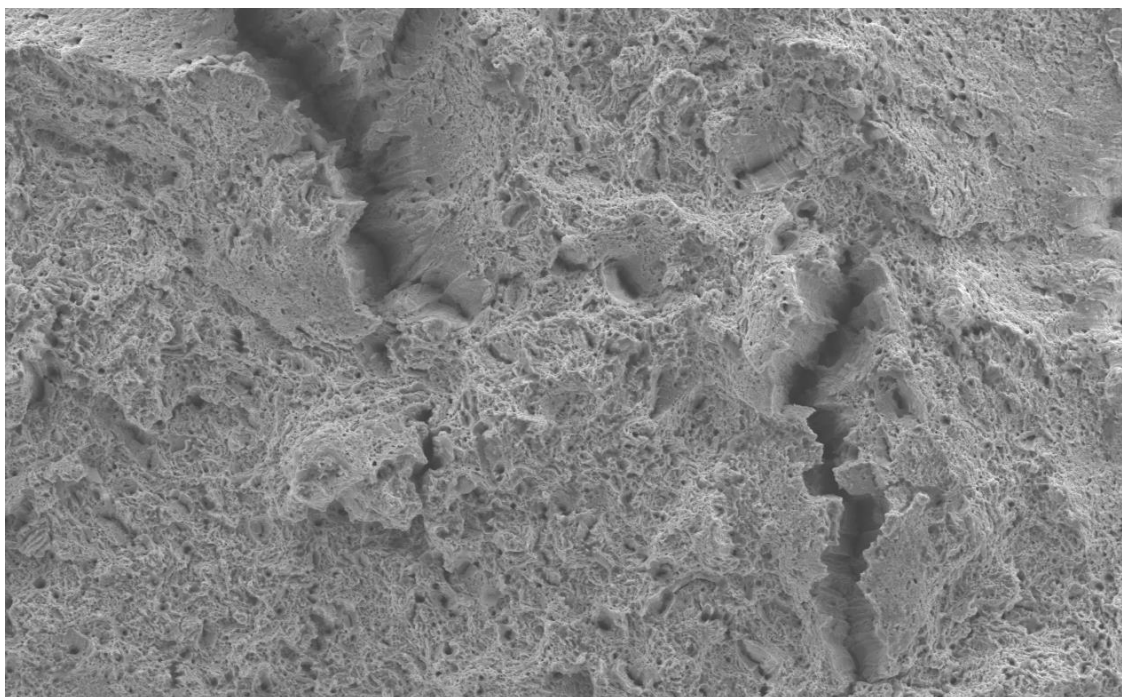
Lomové plochy skupiny C nevykazovaly žádné odlišnosti od zbylých skupin. Opět se jedná vesměs o frézovité lomy se sekundárními trhlinami. Na všech vzorcích byl také patrný krček. Po důkladnějším zkoumání trhlin a morfologie se opět potvrdila přítomnost tvárného lomu. Nikde na lomové ploše nebyly vyhledány známky křehkých oblastí. .



Obrázek 65: Lomová plocha vzorku C2



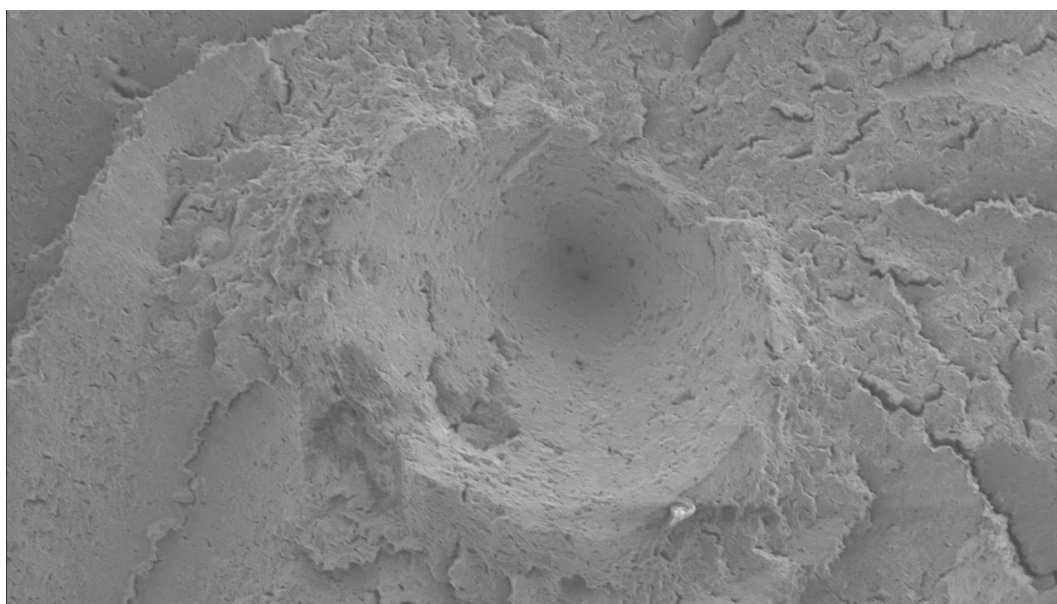
Obrázek 66: Ukončení sekundární trhliny vzorku C2



Obrázek 67: Tvárný lom s drobnými trhlinami vzorku C2

3.10.5. Skupina D

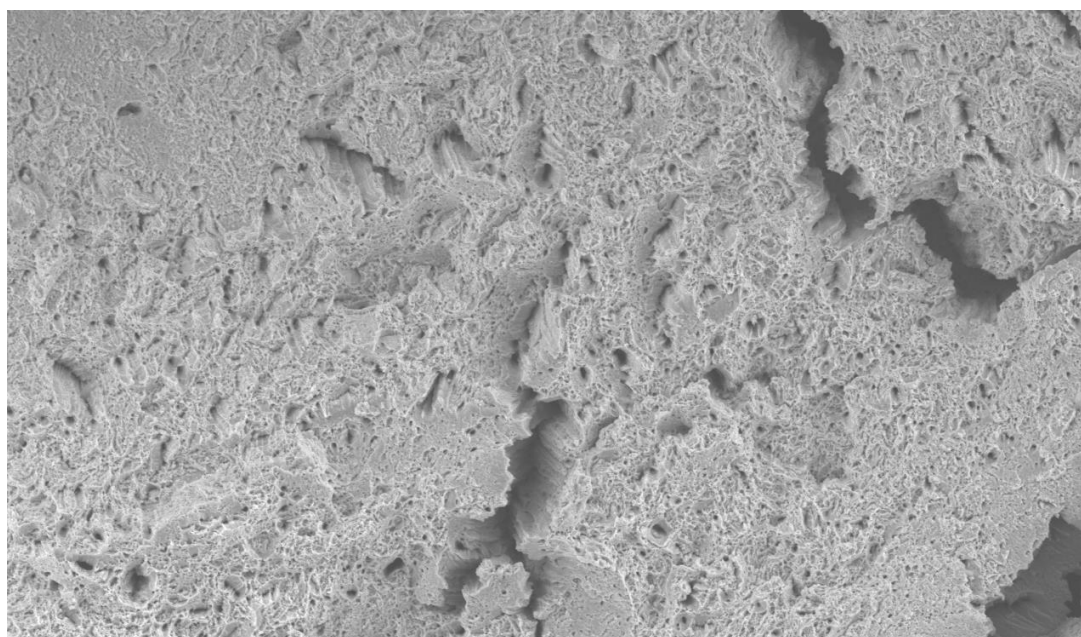
Skupina D vykazovala stejné charakteristiky lomových ploch jako všechny předchozí skupiny. Lomy byly frézovité až na vzorek D3, který měl smykový lom. Uprostřed vzorku D6 byl zkoumán neobvyklý důlek, který po přiblížení vykazoval známky tvárného lomu. V rámci zkoumání skupiny D nebyla objevena křehkost.



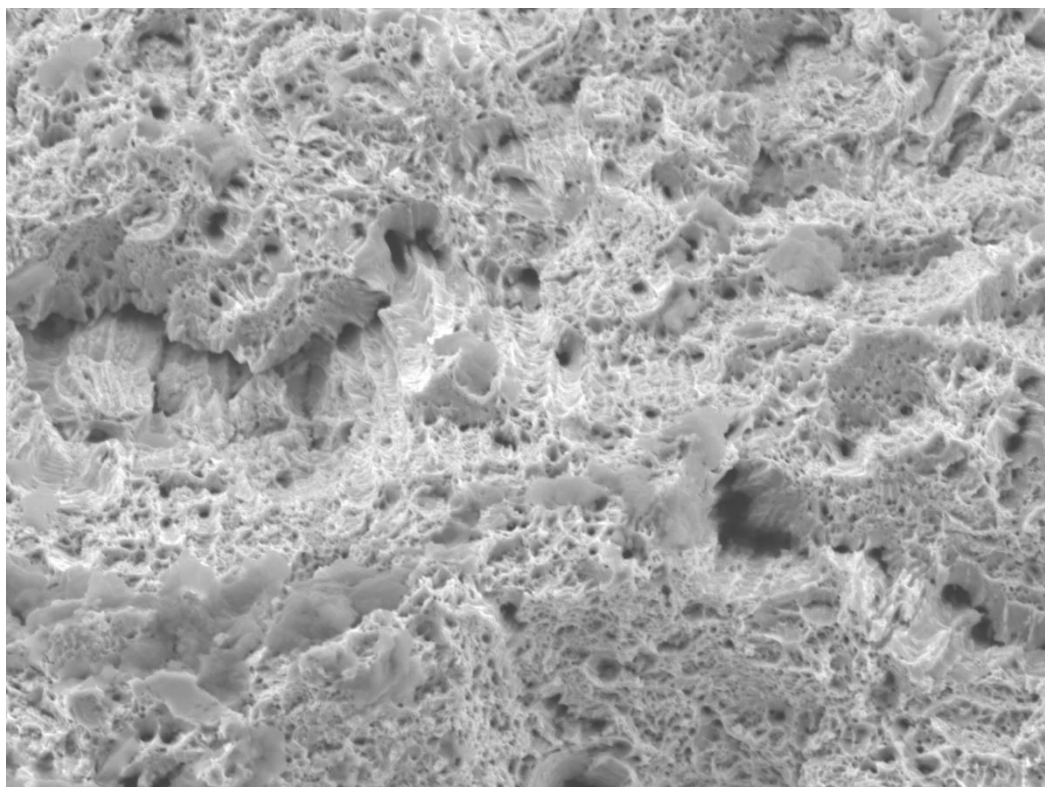
Obrázek 68: Detail důlku uprostřed vzorku D6



Obrázek 69: Lomová plocha vzorku D6



Obrázek 70: Tvárný lom uvnitř důlku



Obrázek 71: Tvárný lom na vzorku D5

V rámci zkoumání lomových ploch všech skupin nebyly nalezeny žádné stopy po lomech způsobených vodíkovou křehkostí. Všechny vzorky vykazovaly chování tvárného lomu s příkladnou morfologií a krčkem mimo lomy smykové. Po fraktografické analýze nelze tvrdit, že by měl vodík ve struktuře nějaký vliv na lomové chování předpínací výztuže.

4 Závěr

Teoretická část diplomové práce měla popsat problematiku vodíkové křehkosti a obecně vliv vodíku na strukturu kovů. Dále pak podrobněji osvětlit jednotlivé mechanismy vzniku vodíkové křehkosti, které mohou potenciálně strukturu předpínacích výztuží ovlivňovat. V dalších částech se zabývala podstatou předpjatých konstrukcí a jejich vývojem. Na závěr teoretické části byly rozebrány základy teorie lomů, jejich dělení a fraktografie, což bylo důležité pro další pochopení a interpretaci výsledků experimentu.

V rámci experimentální části byla zkoumána náchylnost běžně používaných předpínacích výztuží vůči vodíkové křehkosti. Vzorky výztuží byly exponovány ve vodném roztoku síranu sodného v rámci katodické polarizace povrchu za vývoje vodíku. Tedy elektrolytickým rozkladem vody, po dobu předem určených intervalů a následně po menší technologické prodlevě, podrobena zkoušce tahem. Předpínací lana byla v systému zapojena jako katoda (obětovaná anoda byly sítě z korozivzdorné oceli), tudíž se na vzorcích, po dobu průchodu proudu, vytvářel vodík, který mohl volně difundovat do struktury oceli. Po tahových zkouškách na exponovaných vzorcích skupin A, B a C nedocházelo k žádným odchylkám v hodnotách mechanických vlastností oproti referenčním vzorkům bez jakéhokoliv vlivu vodíku ve struktuře kovu. Protože nebylo prokázáno žádné ovlivnění, došlo k úpravě uspořádání experimentu a zkouška tahem probíhala přímo v průběhu expozice (skupina D). Ani u jednoho ze sedmi vzorků skupiny D nebyl rovněž patrný žádný pokles mechanických vlastností.

Následné zkoumání metalografických výbrusů pomocí světelného mikroskopu potvrdilo očekávatelnou čistotu materiálu a jemnozrnnost struktury, která má vliv na velmi dobré mechanické vlastnosti vzorků předpínacích lan. Viditelné bylo protažení zrn důsledkem tvářecích procesů a zkoušky tahem. V rámci další inspekce nebyly nalezeny žádné vady uvnitř materiálu jako např. póry nebo mikrotrhliny.

Následně byl ověřen vliv vodíku na strukturu oceli prostřednictvím analýzy lomových ploch. V rámci fraktografické analýzy lomových ploch na referenčních vzorcích a skupinách A, B, C a D nebyly objeveny ani minimální náznaky křehkého

lomového chování. Po vyhodnocení všech snímků lze předpokládat, že v těchto případech neměl vodík na lomové chování žádný vliv.

I přesto, že se jedná o vysoce pevný materiál pravděpodobně citlivý k vodíkovému křehnutí, nelze z výše uvedených dat tvrdit, že má vodík na strukturu významnější vliv. Zásadním zjištěným faktem zůstává, že většina vzorků po zkoušce tahem praskala mimo exponovanou zónu, tedy i mimo střední pásmo, ve kterém by mělo dojít k přednostnímu porušení. Tento jev svádí k uzavření závěru, že se náhodně ve struktuře materiálu nachází vady z výrobního procesu např. z tavby nebo následného tváření, které mají na pevnost struktury mnohem větší vliv než samotná difuze vodíku a následné křehnutí. Toto tvrzení nelze nijak jednoznačně potvrdit výše provedeným experimentem a jeho výsledky, ale zdá se být pravděpodobným vysvětlením tohoto jevu.

S ohledem na předešlé odborné práce lze diskutovat případný vliv vznikajících korozních produktů na majoritní bázi magnetitu Fe_3O_4 , které i v amorfni, velmi tenké vrstvě, jsou schopny velmi účinně blokovat vstup vodíku do oceli. Důvodem k tomu je velmi nízký difúzní koeficient pro atomární vodík krystalovou mřížkou Fe_3O_4 . K této skutečnosti mohlo dojít i v případě mého experimentu. Detekce amorfni vrstev na válcovitých vzorcích je velmi obtížná i pro dostupné techniky (ESCA – XPS) a v rámci řešení diplomové práce nebyla z kapacitních důvodů možnost využít tuto analytickou techniku. Rovněž nemohla být využita technika elementárního stanovení vodíku ve vzorcích. Obě techniky jsou dále k dispozici v rámci případné výzkumné/komerční spolupráce.

Tato práce potvrzuje výsledky významného množství předešlých studií, které zásadní nebezpečí vodíkové koroze pro aplikačně blízké oceli nepotvrzují. V případě předpínací výztuže v reálné betonové konstrukci je nutno diskutovat dva možné případy. (I) Oblast uvnitř chráničky bez přítomnosti injektážní malty – v tomto případě sice není na povrchu oceli přítomna ochranná vrstva z Fe_3O_4 , nicméně v okolí výztuže je obvykle značné množství vzduchu (vysoký parciální tlak kyslíku), proto nemůže probíhat katodická korozní reakce za vývoje vodíku. Po vyčerpání kyslíku, reakce za vzniku vodíku, může probíhat, ale povrch oceli již je nutně pokryt korozními produkty na bázi magnetitu. (II) Oblast uvnitř chráničky je zcela obsazena

injektážní maltou – v tomto případě je na povrchu výztuže, vlivem alkalické rezervy injektážní malty, přítomna již od počátku přirozená pasivní vrstva na bázi magnetitu.

Tyto racionální závěry mají dvě okrajové podmínky k další diskuzi. První okrajovou podmínkou je rychlost vylučování vodíku na povrchu. Experimentální uspořádání v diplomové práci je založeno na velmi rychlé kinetice vývoje vodíku, a tedy i tvorby korozních produktů na majoritní bázi Fe_3O_4 . Při pomalé kinetice katodické korozní reakce může být ovlivnění oceli vodíkem významnější, neboť se nestačí tvořit souvislá vrstva magnetitu na povrchu oceli. Další okrajovou podmínkou je diskuze vlivu přítomnosti atmosférických korozních produktů na povrchu předpínací výztuže (vkládání již předkorodované výztuže bývá rovněž stavební praxí). Skladba takových korozních produktů (polymorfni modifikace $\text{FeO}(\text{OH})$) nezajišťuje tvorbu přirozené ochranné pasivní vrstvy (Fe_3O_4) v alkalickém prostředí a difúzní koeficient vodíku touto vrstvou je významnější. Významnější potom může být riziko vzniku vodíkové křehkosti v tomto případě, kdy je chránička zcela obsazená injektážní maltou.

Nelze opomenout diskuze vlivu teploty, neboť s rostoucí teplotou roste kinetické parametry vstupu a případném výstupu vodíku ocelí, a rovněž i vlastní kinetika tvorby vodíku na povrchu oceli, vlivem katodické polarizace.

Výsledky diplomové práce potvrzují spíše ty závěry odborníků, které z obecného hlediska vidí kolaps mostů s aplikovanou předpínací výztuží vlivem elektrochemické formy korozního poškození s katodickou korozní reakcí redukcí atmosférického kyslíku se silnou stimulací vlivem přítomnosti chloridových aniontů, při kontaminaci injektážní malty. Vliv případného vodíku za vzniku vodíkového zkřehnutí hodnotí jako jev zcela okrajový.

Práce týkající se ovlivnění předpínací výztuže vodíkovou křehkostí bude do budoucna pokračovat, protože doposud nebyly vyzkoušeny všechny možnosti expozice vzorků a bylo by dobré objasnit a vysvětlit jevy excentrického praskání vzorků. Další pokračování výzkumu by se mělo zabývat exponováním vzorků, které budou dlouhodobě zatíženy silou těsně pod mezí kluzu, čímž by se měla opět výrazně zvýšit náchylnost struktury k vodíkovému křehnutí.

5 Citovaná literatura

- [1] FRIDRICH, R. Vodíková koroze a křehkost kovů. Praha: SNTL, 1963.
- [2] Vodík, chemický prvek H, popis a vlastnosti. Periodická soustava prvků [online]. Copyright © 2009 [cit.13.07.2023]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/1.html>
- [3] JANOVEC, J., ZUNA, P., a MACEK, K. Fyzikální metalurgie. Praha: Vydavatelství, ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02935-2.
- [4] TRAJDA, A.; CHATZIDOUROS, E.; JOUIAD, M., Review of hydrogen-assisted cracking models for application to service lifetime prediction
- [5] ROGERS, H. C., Hydrogen Embrittlement of Metals. Science 1968, 159 (3819), 1057-1064.
- [6] BHADESHIA, H.; HONEYCOMBE, R., STEELS: Microstructure and Properties, Fourth Edition. Fourth ed.; Elsevier Science and Technology Books, Inc: Place of publication not identified, 2017.
- [7] DWIVEDI, S. K. a VISHWAKARMA M. Hydrogen embrittlement in different materials: A review. International Journal of Hydrogen Energy [online]. 2018, 43(46), 21603-21616 [cit. 2023-06-29]. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.09.201. ISSN 03603199. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319918331306>
- [8] KREIBICH, V. Koroze a technologie povrchových úprav. Praha: ČVUT, 1992. ISBN 80-01-00750-2.
- [9] MACEK, K., a ZUNA, P. Nauka o materiálu. Praha: ČVUT, 1996. ISBN 80-01-01507-6.
- [10] LYNCH, S. Hydrogen embrittlement (HE) phenomena and mechanisms. Stress Corrosion Cracking [online]. Elsevier, 2011, 2011, s. 90-130 [cit. 2023-06-30]. DOI: 10.1533/9780857093769.1.90. ISBN 9781845696733. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978184569673350002X>
- [11] HYSPECKÁ, L. a MAZANEC, K. Vodíková křehkost konstrukčních ocelí o vyšších parametrech. Praha: Academia, 1978. Studie ČSAV.
- [12] HRDINOVÁ, H., KREIBICH, V., KUDLÁČEK, J., FALTÝNKOVÁ, A. a VALEŠ, M. Vliv vodíku na povrchově upravený materiál. Praha: TISK AS, 2016. [cit. 2023-06-30]. ISBN 978-80-87583-15-9
- [13] KREIBICH, V. a HOLEČEK, P. Vodík při procesu povrchových úprav. Povrcháři [online]. [cit. 2023-06-30]. Dostupné z: http://povrchari.cz/kestazeni/201001_povrchari.pdf

- [14] VENEZUELA U. Q. J., ZHANG, M., ZHOU Q., a ATRENS, A. Hydrogen trapping in some advanced high strength steels. Corrosion Science [online]. 2016, 111, 770-785 [cit. 2023-06-30]. DOI: 10.1016/j.corsci.2016.05.046. ISSN 0010938X. Dostupné z:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010938X16302682>
- [15] JENSEN, R., PREIKSCHAT P. Hydrogen Embrittlement [online]. SurTec Technical Letter, 2016 [cit. 2023-06-30].
- [16] ŠEFL, V.; HRON, T.; PROCHÁZKA, L. Nové možnosti hodnocení a důsledky interakce vodíku s kovy, 2010.
- [17] ALLAM, T.; GUO, X.; LIPÍNSKA-CHWAŁEK, M.; HAMADA, A.; AHMED, E.; BLECK, W., Impact of precipitates on the hydrogen embrittlement behavior of a V-alloyed medium-manganese austenitic stainless steel. Journal of Materials Research and Technology 2020, 9 (6), 13524-13538.
- [18] SAN MARCHI, C. W.; SOMERDAY, B. P. Technical reference for hydrogen compatibility of materials; Sandia National Laboratories (SNL), Albuquerque, NM, and Livermore, CA ...: 2012.
- [19] ZAKROCZYMSKI, T., Adaptation of the electrochemical permeation technique for studying entry, transport and trapping of hydrogen in metals. Electrochimica Acta 2006, 51 (11), 2261-2266
- [20] NAVRÁTIL, J. *Předpjaté betonové konstrukce*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-561-7.
- [21] LANÍKOVÁ, I. Předpjatý beton [přednáška]. In: Vysoké učení technické v Brně [online]. Brno: ČVUT v Brně 2012. [vid. 13. 07. 2023]. Dostupné z:
www.fce.vutbr.cz/BZK/lanikova.i/CL01_prednaska_12.pdf
- [22] ŠŤASTNÝ, M. *Betonové konstrukce*. Brno: Vysoké učení technické, 1979.
- [23] BILLIG, K. *Beton s armaturou předpjatou v tlaku*. Přeložil Jaroslav HÁJEK, přeložil Jan KŮRKA. Praha: Ústav architektury a územního plánování, 1952. Překlady.
- [24] COUFAL, R., KALNÝ M., KOLÍSKO J. a VÍTEK J. L. *Ultra vysokohodnotný beton (UHPC)*. [Praha]: Česká betonářská společnost ČSSI, 2022. Technická pravidla ČBS. ISBN 978-80-907611-7-9.
- [25] BAŽANT, B. *Předpínací výztuž a její využití*. Praha: SNTL, 1978. Ediční řada techn. publikací Čes. svazu stavebních inženýrů.
- [26] ROZMUS, A. *Ocelové materiály pro betonářskou a předpínací výztuž do betonu: jejich vývoj, vlastnosti, druhy a výroba v ČSSR*. Praha: Technickoekonomický výzkumný ústav hutního průmyslu, Poradna pro užití oceli, 1970. Poradenská pomůcka TEVÚH.

- [27] KORECKÝ, J. *Tažený ocelový drát, jeho výroba a zpracování: určeno jako technimum pro nižší a střední kádry tažiren*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1954. Řada hutnické literatury.
- [28] VÍTEK J.: *Historie předpjatého betonu*. Informační centrum ČKAIT 2016, ISBN 978-80-87438-84-8
- [29] VOVES B.: *Trvanlivost konstrukcí z předpjatého betonu*, SNTL Nakladatelství technické literatury 1988, 04-706-88
- [30] *Schematic diagrams of HE mechanisms* [online]. [cit. 2023-07-14]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagrams-of-HE-mechanisms-a-HIPT-64-hydrogen-induced-phase-transformation_fig5_340851994
- [31] *Názvosloví předpínacích prvků* [online]. [cit. 2023-07-14]. Dostupné z: <https://studijni-svet.cz/predpjaty-beton-maturitni-otazka/>
- [32] *Avoiding stress cracking of ferritic austenitic steels* [online]. [cit. 2023-07-14]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/avoiding-hydrogen-embrittlement-stress-cracking-of-ferritic-austenitic-stainless-steels-under-cathodic-protection-june-2004>
- [33] *Hydrogen embrittlement of steels* [online]. [cit. 2023-07-14]. Dostupné z: <https://www.imetllc.com/hydrogen-embrittlement-steel/>
- [34] *Využití předpjatého betonu v pozemním stavitelství - Karlín Hall 2* [online]. [cit. 2023-07-14]. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/karlin-hall-2-vyuziti-predpjateho-betonu-v-pozemnim-stavitelstvi/>
- [35] VACEK, V., POKORNÝ P., a KOLÍSKO, J., *Vliv koroze předpínací výztuže na její vlastnosti a možnosti sanace takto vyztužených betonových konstrukcí* [online]. [cit. 2023-07-14]. Dostupné z: <https://silnice-zeleznice.cz/materialy-a-technologie/vliv-koroze-predpinaci-vyztuze-na-jejivlastnosti-a-moznosti-sanace-takto-vyztuzenych-betonovych-konstrukci-91>
- [36] *Why the Hindenburg Disaster Is Still Worth Remembering* [online]. [cit. 2023-07-14]. Dostupné z: <https://time.com/4764799/hindenburg-disaster-80-years/>
- [37] LOWER, S. *The hydronium ion* [online]. [cit. 2023-07-31]. Dostupné z: https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_%28Physical_and_Theoretical_Chemistry%29/Acids_and_Bases/Acids_and_Bases_in_Aqueous_Solutions/The_Hydronium_Ion
- [38] *General Rafael Urdaneta Bridge* [online]. [cit. 2023-07-31]. Dostupné z: <https://www.atlasobscura.com/places/general-rafael-urdaneta-bridge>
- [39] *Pont de Luzancy* [online]. [cit. 2023-07-31]. Dostupné z: <https://www.coulommierspaysdebrie-tourisme.fr/luzancy/>

- [40] Základní materiálové charakteristiky betonu [online]. [cit. 2023-08-01]. Dostupné z: <https://www.bzk.fce.vutbr.cz/wp-content/uploads/sites/6/2021/09/Materi%C3%A1lov%C3%A9-charakteristiky.pdf>
- [41] LI, X. Hydrogen traps in the steels [online]. [cit. 2023-08-01]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Hydrogen-traps-in-the-steels-39-a-interstitial-sites-b-surface-traps-c-subsurface_fig2_340851994
- [42] OGORODNIKOVA, O. Schematic potential energy for hydrogen chemisorption [online]. [cit. 2023-08-01]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-potential-energy-diagram-for-hydrogen-chemisorption-solution-and-trapping-at_fig4_281820382
- [43] HAUŠILD, P. a SIEGL, J. Fraktografický atlas [online]. [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: <https://fraktografie.fjfi.cvut.cz/atlas.html>
- [44] OVMT Mechanické zkoušky [online]. [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/41155-Ovmt-mechanicke-zkousky.html>
- [45] LANGEROVÁ, V. Náchylnost ocelí pro skladování zemního plynu k vodíkovému zkřehnutí. Praha, 2022. Diplomová práce. VŠCHT. Vedoucí práce Tomáš Prošek.
- [46] MACHALÍNEK, M. *Problematika vodíkové křehkosti v materiálu*. Praha, 2019. Bakalářská práce. ČVUT. Vedoucí práce Viktor Kreibich.
- [47] ČSN 73 6221 *Prohlídky mostů pozemních komunikací*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [48] ČSN EN ISO 15630-3 (420365) *Ocel pro výztuž a předpínání do betonu - Zkušební metody - Část 3: Oceli pro předpínání*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví

Seznam tabulek

Tabulka 1: Tlakové a tahové vlastnosti základních pevnostních tříd betonu [40].....	32
Tabulka 2: Parametry jednotlivých typů předpínacích výztuží	40
Tabulka 3: Chemické složení oceli pro použité předpínací výztuže.....	41
Tabulka 4: Ukázka žlutě vložených hodnot.....	53
Tabulka 5: Mechanické vlastnosti referenčních vzorků po zkoušce tahem.....	55
Tabulka 6: Mechanické vlastnosti vzorků po 2 hodinách expozice	56
Tabulka 7: Mechanické vlastnosti vzorků po 6 hodinách expozice	58
Tabulka 8: Mechanické vlastnosti vzorků skupiny C	61
Tabulka 9: Mechanické vlastnosti vzorků skupiny D.....	63

Seznam obrázků

Obrázek 1: Lom způsobený vodíkovou křehkostí [33].....	15
Obrázek 2: Hořící vzducholod' LZ 129 Hindenburg naplněná vodíkem [36]	18
Obrázek 3: Srovnání atomových poloměrů	18
Obrázek 4: Vodíková trhлина ve svarovém spoji [32].....	19
Obrázek 5: Koroze vedoucí k lomu předpínacích drátů [foto autora]	20
Obrázek 6: Hydronium [37].....	20
Obrázek 7: Schématické znázornění vstupu z plynné fáze [10]	22
Obrázek 8: Schéma shlukování vodíku po hranicích zrn a následná tvorba trhlín [7] ..	24
Obrázek 9: Schématické znázornění mechanismů vodíkové křehkosti [30]	25
Obrázek 10: Typy vodíkových pastí [41]	27
Obrázek 11: Graf energetických hladin jednotlivých vodíkových pastí [42].....	28
Obrázek 12: Venezuelský most z předpjatého betonu General Rafael Urdaneta [38] ..	30
Obrázek 13: Pont de Luzancy, první předpjatý most ve Francii [39].....	31
Obrázek 14: Schematické znázornění rozložení napětí [20].....	32
Obrázek 15: Dutina v injektážním kanálku a koroze předpínací výztuže [foto autora] ..	33
Obrázek 16: Kotvení předpínacích lan [34].....	34
Obrázek 17: Tvárný lom [43]	35
Obrázek 18: Křehký lom s charakteristickými fasetami [43].....	36
Obrázek 19: Další typy lomových ploch [44].....	37
Obrázek 20: Lamely únavového lomu [43]	37
Obrázek 21: Názvosloví předpínacích prvků [31]	38
Obrázek 22: Rozpletené předpínací lano po zkoušce tahem	39
Obrázek 23: Schématický řez sedmidrátových pletencem	40
Obrázek 24: Cívka s předpínacím lanem	41
Obrázek 25: Konzervované a odmaštěné předpínací lano	42
Obrázek 26: Schéma zapojení.....	43
Obrázek 27: Usměrňovací můstek a toroidní transformátor.....	44
Obrázek 28: Zobrazení křivek $j(E)$ pro korozní děj – vyznačení samovolného korozního potenciálu $E_{kor}(E_r)$ a korozního potenciálu E při katodické polarizaci.....	45
Obrázek 29: Schéma expoziční cely a vedení svazku předpínací výztuže jako zkušební vzorku	46
Obrázek 30: Tvorba vodíku na povrchu vzorku na počátku expozice.....	48

Obrázek 31: Stav lázně po hodině expozice	49
Obrázek 32: Zkušební stroj Alfred Amsler s instalovaným vzorkem.....	50
Obrázek 33: Výkres samosvorné kuželky.....	51
Obrázek 34: Samosvorná kuželka a pouzdro	51
Obrázek 35: Potenciometrický snímač	52
Obrázek 36: Snímek automaticky generované tabulky a grafu	53
Obrázek 37: Lom vzorku REF_5	54
Obrázek 38: Tahový diagram vzorku REF_2	55
Obrázek 39: Tahový diagram vzorku REF_6	56
Obrázek 40: Tahový diagram vzorku A3 po 2 hod expozici	57
Obrázek 41: Tahový diagram vzorku A5 po 2 hod expozici	57
Obrázek 42: Tahový diagram vzorku B2 po 6 hod expozici	59
Obrázek 43: Tahový diagram vzorku B4 po 6 hod expozici	59
Obrázek 44: Krystalizace síranu sodného na vzorku po expozici	60
Obrázek 45: Tahový diagram vzorku C4.....	61
Obrázek 46: Tahová zkouška přímo při expozici	62
Obrázek 47: Vzorky předpínací výztuže zalité v pryskyřici.....	63
Obrázek 48: Mikročistata v podélném směru	64
Obrázek 49: Mikročistota v příčném směru.....	64
Obrázek 50: Leptaný vzorek bez zkoušky tahem	65
Obrázek 51: Protážení zrn ve směru tahové zkoušky	65
Obrázek 52: Struktura vzorku A7	66
Obrázek 53: Podélný řez strukturou vzorku B5.....	67
Obrázek 54: Snímek z příčného řezu vzorku B3	67
Obrázek 55: Struktura vzorku D2	68
Obrázek 56: Lomová plocha vzorku REF_3, frézovitý lom.....	69
Obrázek 57: Struktura lomové plochy REF_3, tvárný lom	69
Obrázek 58: Lomová plocha vzorku REF_5	70
Obrázek 59: Detail trhliny frézovitého lomu vzorku REF_5.....	71
Obrázek 60: Lomová plocha vzorku A2	72
Obrázek 61: Lomová plocha vzorku A5	72
Obrázek 62: Struktura lomu vzorku A5	73
Obrázek 63: Lomová plocha vzorku B1	74

Obrázek 64: Detail trhliny na lomové ploše vzorku B1	74
Obrázek 65: Lomová plocha vzorku C2	75
Obrázek 66: Ukončení sekundární trhliny vzorku C2	75
Obrázek 67: Tvárný lom s drobnými trhlínami vzorku C2.....	76
Obrázek 68: Detail důlku uprostřed vzorku D6.....	76
Obrázek 69: Lomová plocha vzorku D6.....	77
Obrázek 70: Tvárný lom uvnitř důlku	77
Obrázek 71: Tvárný lom na vzorku D5	78