

Vliv nízkých teplot na pevnost nosné ocelové konstrukce, svarových a šroubových spojů v zamrazovacích tunelech

Jan Rychnovský

Bakalářská práce
2019

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan Rychnovský**
Osobní číslo: **T16526**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Vliv nízkých teplot na pevnost nosné ocelové konstrukce, svarových a šroubových spojů v zamrazovacích tunelech**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární rešerše v dané oblasti
2. Příprava zkušebních těles pro mechanické zkoušky
3. Provedení experimentálních zkoušek
4. Vyhodnocení výsledků z hlediska praktických aplikací

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. M. Hluchý, O. Modráček, R. Paňák Strojírenská technologie 1. 2. díl, Metalografie a tepelné zpracování, 173 s. ISBN: 80-7183-265-0
2. PTÁČEK L. a kol. Nauka o materiálu II. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s r.o. 1999. 350 s. ISBN 80-7204-130-4

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Milan Žaludek, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

2. ledna 2019

Termín odevzdání bakalářské práce:

24. května 2019

Vě Zlíně dne 19. února 2019

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 15.5.2019

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevyjádřeně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

²⁶ zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užit či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výtěžku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídí k výši výtěžku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

Jméno a příjmení autora: Jan Rychnovský

Název bakalářské práce: Vliv nízkých teplot na pevnost nosné ocelové konstrukce, svarových a šroubových spojů v zamrazovacích tunelech

Název v angličtině: Influence of low teperatures on the strength of the supporting steel structure, welding and screw connetions in freezing tunnels

Studijní obor: Procesní inženýrství – Technologická zařízení

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Milan Žaludek, Ph.D.

Rok obhajoby: 2019

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá ověřením, zdali po 25-ti letech provozu zamrazovacích tunelů, bude mít hlavní ocelová konstrukce a pomocná konstrukce pro produkty ve visu, pro pohyb údržby chlazení, včetně pojezdových drah, svarových a šroubových spojů vlastnosti, které měla při uvedení do provozu.

V teoretické části je uvedena problematika chování materiálu při nízkých teplotách a při změně teplot a princip mechanických zkoušek.

Praktická část se zabývá postupem mechanických zkoušek a měřením na zařízeních pro statickou a cyklickou únavu.

Klíčová slova: zamrazovací tunely, ocelová konstrukce, mechanické zkoušky, statická a cyklická únava materiálu

ABSTRACT

The bachelor's thesis deals with a verification, that after 25 years of operation, the main steel structure and auxiliary steel structure for hanging products, a movement of a maintenance of cooling, including roller tracks, welded and screw connections, have the same properties, which they had at the beginning of the working.

In the theoretical part, a problem of behaving of the material at low temperatures, changes between temperatures and a principal of mechanical testing, is mentioned.

The practical part deals with a process of the mechanical testing and the measurement on the machines for a static and a cyclic fatigue.

Keywords: freezing tunnels, a steel structure, mechanical tests, a static and a cyclic fatigue

Poděkování

Děkuji panu Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za odborné vedení práce, věcné připomínky, dobré rady, ochotu, vstřícnost při konzultacích během vypracovávání bakalářské práce a v neposlední řadě za velkou pomoc během realizování zkoušek.

Chtěl bych také velmi poděkovat své rodině a přítelkyni, za obrovskou pomoc a oporu, kterou mi za celou dobu studia poskytli.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně dne:

.....

Podpis

OBSAH

ÚVOD.....	15
I TEORETICKÁ ČÁST.....	16
1 MATERIÁLY VE STROJÍRENSTVÍ	17
1.1 Kovy	17
1.1.1 Vlastnosti kovů a slitin.....	17
1.1.2 Krystalická stavba kovů	17
2 MECHANICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLU	18
2.1 MECHANICKÉ ZKOUŠKY – ROZDĚLENÍ.....	18
2.2 MECHANICKÉ ZKOUŠKY STATICKÉ	19
2.2.1 Zkouška tahem	20
2.3 MECHANICKÉ ZKOUŠKY DYNAMICKÉ	26
2.3.1 Zkouška opětovným namáháním	26
2.4 ZVLÁŠTNÍ TECHNICKÉ ZKOUŠKY	28
2.4.1 Zkoušky za snížených teplot	28
3 OCELI.....	29
3.1 OCELI TŘ. 11	29
3.1.1 Oceli pevnostní řady 34 až 45	29
3.2 OCELI TŘ. 17	29
4 PŘEHLED TECHNOLOGIE – SVAŘOVÁNÍ.....	30
4.1 SVAŘITELNOST.....	30
4.1.1 Plamenové svařování	30
4.1.2 Svařování elektrickým obloukem	30
5 POVRCHOVÁ ÚPRAVA MATERIÁLU	31
5.1 OCHRANA PROTI KOROZI.....	31
5.1.1 Žárové zinkování.....	31
6 OCELI DO NÍZKÝCH A KRYOGENNÍCH TEPLOT.....	32
6.1 KOROZIVZDORNÉ OCELI DO NÍZKÝCH TEPLOT	32
6.2 UHLÍKOVÉ OCELI DO NÍZKÝCH TEPLOT	32
7 ZAMRAŽOVACÍ TUNELY	33
7.1 ODSTÁVKY, SANITACE, ÚDRŽBA.....	33
7.2 BEZPEČNOST PRÁCE	33
II PRAKTICKÁ ČÁST	34
8 VÝBĚR MATERIÁLU A VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	35
8.1 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	35
8.2 ROZMĚRY ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	35
8.2.1 Zkušební tělesa z tyče kruhového průřezu	35
8.2.2 Zkušební tělesa z ploché tyče obdélníkového průřezu.....	36

9	MECHANICKÉ ZKOUŠKY TĚLES.....	37
9.1	ZAŘÍZENÍ PRO PROVEDENÍ ZKOUŠEK.....	37
9.2	STATICÁ ZKOUŠKA TAHEM.....	38
9.2.1	Zkouška tahem pro tělesa s obdélníkovým průřezem při teplotě 20°C a -30°C	38
9.2.2	Vyhodnocení naměřených dat	39
9.2.3	Zkouška tahem pro tělesa s kruhovým průřezem při teplotě 20°C a -30°C.....	43
9.2.4	Vyhodnocení naměřených dat	44
9.2.5	Srovnání a vyhodnocení základních mechanických vlastností po tahové zkoušce a jejich grafické zobrazení	48
9.3	CYKlickÁ ÚNAVovÁ ZKOUŠKA	50
9.3.1	Parametry a uspořádání cyklické zkoušky	51
9.3.2	Cyklická únavová zkouška pro těleso s obdélníkovým průřezem při teplotě 20°C a -30°C	51
9.3.3	Vyhodnocení naměřených dat	52
9.3.4	Cyklická únavová zkouška pro těleso s kruhovým průřezem při teplotě 20°C a -30°C	55
9.3.5	Vyhodnocení naměřených dat	56
	ZÁVĚR	60
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	62
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	64
	SEZNAM OBRÁZKŮ	66
	SEZNAM TABULEK.....	68

ÚVOD

Pro svoji bakalářskou práci na téma Vliv nízkých teplot na pevnost nosné ocelové konstrukce, svarových a šroubových spojů v zamrazovacích tunelech jsem využil podkladu pro přednášku Oceli do nízkých a kryogenních teplot.

Vzhledem ke skutečnosti, že v zamrazovacích tunelech je konstantní teplota -40°C , jsem se zaměřil na problematiku pevnosti hlavní nosné ocelové konstrukce, ale především na pevnost pomocné ocelové konstrukce, která má za úkol držet pojezdové dráhy na konstrukci hlavní.

Konstrukce jsou zároveň zinkované a jsou k sobě svařeny nebo sešroubovány. Šrouby a matice, které zároveň drží pohromadě ocelovou konstrukci a dráhy pro pohyb produktu ve visu, jsou vyrobeny z nerezové oceli. Na některých místech konstrukce se již projevuje poškozené zinkování z důvodu sanitace a osekávání ledu, tedy i výskyt koroze. Odstávka se provádí na vyžádání údržby nebo obsluhy chlazení. Díky tomu se v tunelu vypne chlazení a teplota dosáhne 0°C , při které mohou lépe provést nutné úkony spojené s údržbou atd.

Z důvodu stáří konstrukce, nízkých provozních teplot v tunelech, ale i měnících se teplot při provádění údržby a sanitace, bych rád ověřil, že tyto parametry nebudou způsobovat v budoucnu problémy při manipulaci s produktem ve visu, pohybu ručně vedených a vysokozdvížných paletových vozíků, a hlavně bezpečnosti práce, při uvedení tunelů zpět na provozní teplotu a vnitřní manipulaci s produkty.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 MATERIÁLY VE STROJÍRENSTVÍ

1.1 Kovy

Charakteristické vlastnosti pro kovové materiály jsou vysoké moduly pružnosti, možnosti zpevnění přidáním dalších prvků (legováním) a tepelným zpracováním. Jsou houževnaté a dobře se tvarují, disponují dobrou tepelnou a elektrickou vodivostí. [1]

1.1.1 Vlastnosti kovů a slitin

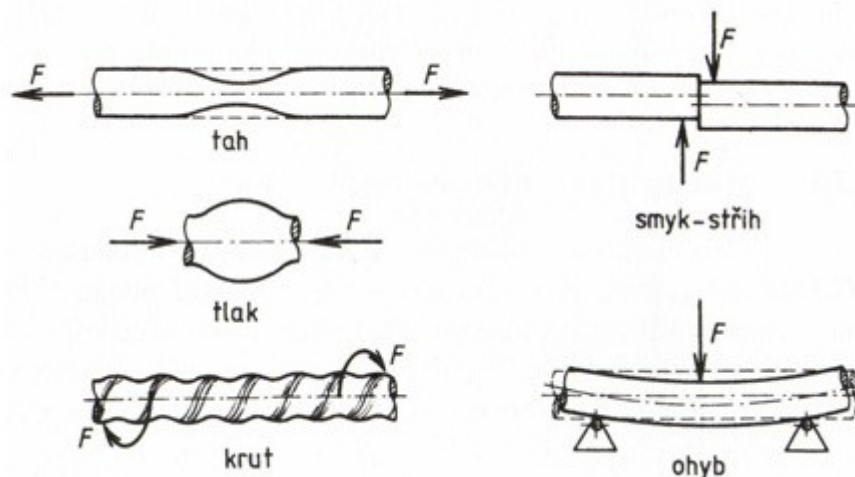
Abychom mohli posoudit technické využití a správně zvolit způsob výroby, je třeba znát jejich fyzikální, mechanické, technologické a chemické vlastnosti. Vlastnost materiálu závisí na stavu, který charakterizuje jeho výslednou strukturu po určitém zpracování. Fyzikální vlastnosti jsou například modul pružnosti v tahu, hustota, tepelná vodivost a jiné. Posouzení chemických vlastností je důležité, aby bylo zjištěno chování materiálu při normálních nebo zvýšených teplotách v prostředí různých látek. Mechanické vlastnosti jsou určovány působením různých faktorů a jsou zjišťovány na zkušebních zařízeních a strojích. Tvar, rozměry a způsoby zkoušení nám stanovují normy. Technologické vlastnosti jsou závislosti souborů fyzikálních, chemických a mechanických vlastností, patří sem například slévatelnost, tvařitelnost, svařitelnost, obrobitelnost. [1]

1.1.2 Krystalická stavba kovů

Kovy jsou v tuhém stavu krystalické látky. Tyto látky se vyznačují zákonitým prostorovým uspořádáním svých stavebních částí (atomů). Krystalické mřížky mají v různých rovinách a směrech rozdílné vlastnosti (anizotropie). Kovy a jejich slitiny nejčastěji krystalizují v krystalických soustavách: kubické prostorově centrované, kubické plošně centrované, hexagonální. [1],[10],[11],[16]

2 MECHANICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLU

Materiály jsou při zpracování i při používání vystaveny různým druhům namáhání. Jedná se tah, tlak, ohyb, krut a stříh. Uvedená namáhání většinou nepůsobí pouze samostatně, ale také v různých kombinacích. Materiál je například namáhán současně tahem a tlakem nebo tahem, ohybem i krutem. Z důvodu, aby mohl materiál těmto namáháním odolávat, musí mít určité vlastnosti a těmi jsou pevnost, tvrdost, pružnost, tvárnost a jiné. Teplota má také značný vliv na mechanické vlastnosti materiálů. Při působení určitých teplot se mění krystalická struktura materiálů, a tím i mechanické vlastnosti materiálu. Například díky tváření kovů za studena se deformují krystalické mřížky, a tak v nich vzniká vnitřní pnutí. Tím se zvětšuje jejich pevnost, ale zmenšuje tažnost. [2]



Obrázek 1 - Únavová křivka napětí

2.1 Mechanické zkoušky – rozdělení

Mechanickými zkouškami získáváme potřebné údaje, které jsou nutné pro navržení tvaru, rozměrů a materiálů strojních součástí.

Z hlediska, jak nám působí síly na zkušební těleso, rozdělujeme mechanické zkoušky takto:

- Statické zkoušky – zvětšujeme při nich zatížení poměrně zvolna. Působí obvykle několik minut, při dlouhých zkouškách několik dní až let.
- Dynamické zkoušky rázové a cyklické – síla zde působí nárazově po zlomek sekundy. Při cyklických únavových zkouškách (tzv. zkoušky na únavu materiálu) se proměnné zatížení opakuje od mnoha cyklů za sekundu až do miliónů jejich celkového počtu.

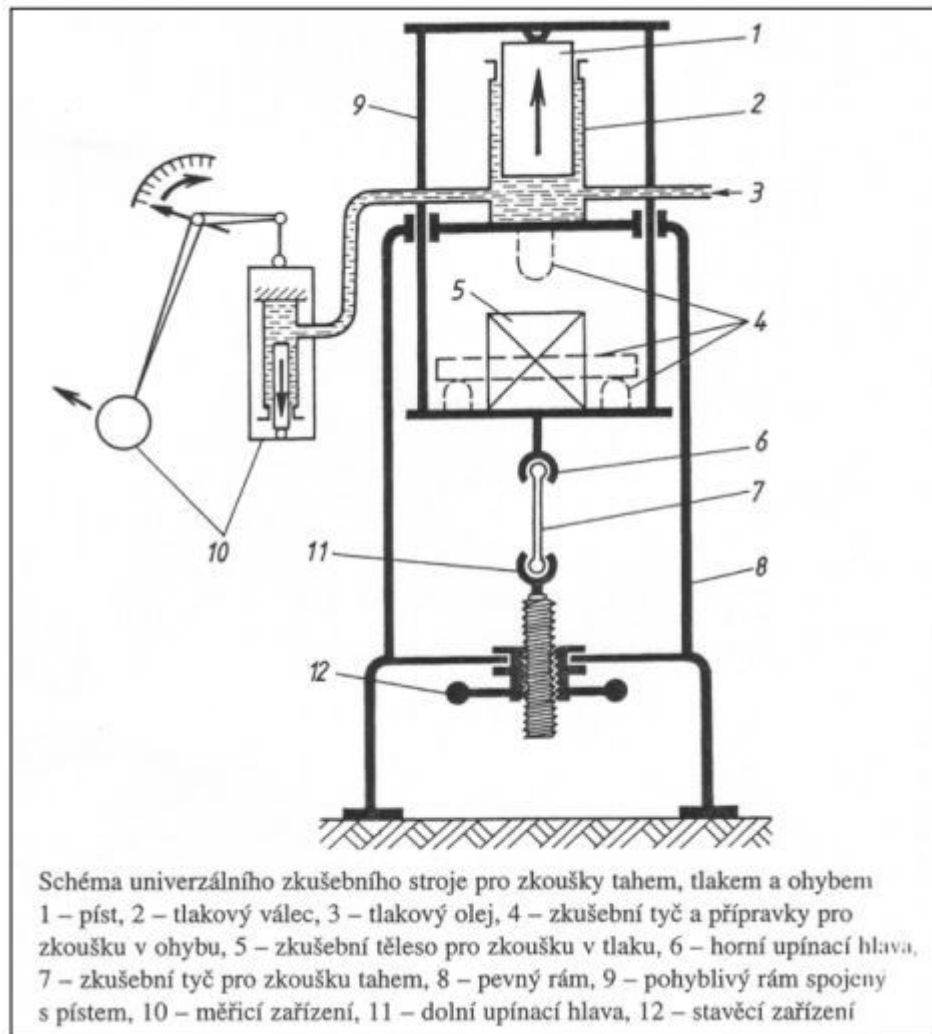
- Zkoušky podle teplot, kde je dělíme na zkoušky za normálních teplot, zvýšených teplot nebo snížených teplot. [2]

2.2 Mechanické zkoušky statické

Jedná se o základní zkoušky mechanického zkoušení materiálu. Materiál zatěžujeme pozvolna a bez rázu. Buď zatěžujeme materiál pouze jednou, nebo zatěžování několikrát opakujeme. Podle toho, jak nám působí zatěžující síla, rozdělujeme tyto zkoušky na zkoušky pevnosti v tahu, tlaku, ohybu, krutu a stříhu.

Zkušební stroje existují buď jednoúčelové (používají se pro jeden druh zkoušek), nebo univerzální, kde pomocí vhodných přípravků lze provádět různé druhy zkoušek. [2]

Zde na obrázku 2 je zobrazeno schéma univerzálního zkušebního stroje. Přivádíme tlakový olej do tlakového válce a tím se zvedá pohyblivý rám stroje. Zkušební tyče při tahové zkoušce se upínají do upínacích hlav. Zkouška pevnosti v tlaku se provádí na zkušební kostce nebo válečku, který je položen na desce pohyblivého rámu. Při zkoušce pevnosti v ohybu pokládáme zkušební vzorek na dvě podpěry a namáhání je vyvozeno ohýbacím trnem připevněným na horní desku pevného rámu. Měřicí zařízení – tzv. kyvadlový manometr, je spojeno potrubím s pracovním prostorem tlakového válce. Tlak působící na píst měřicího tlakového válečku je vyvážen kyvadlem se závažím. Ručička na ramenu páky kyvadla ukazuje na stupnici měřicího zařízení zatížení v jednotkách síly, tj. v newtonech. [2]



Obrázek 2 - Schéma univerzálního zkušebního stroje pro zkoušky tahem, tlakem a ohybem

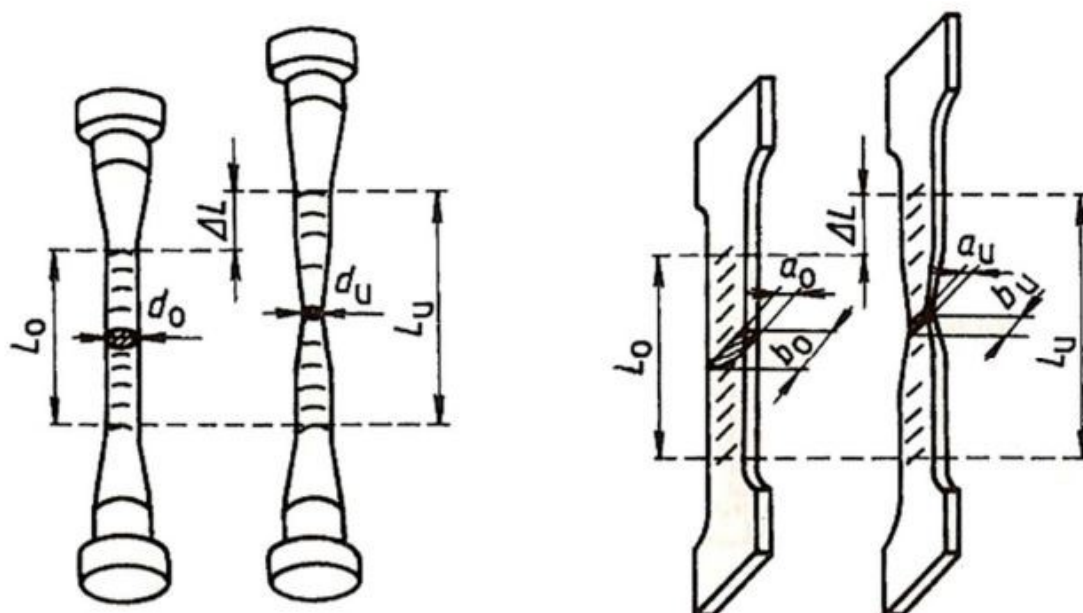
2.2.1 Zkouška tahem

Zkouška tahem patří mezi nejrozšířenější statické zkoušky. Je normalizována podle normy ČSN EN 10002-1 (42 0310):1994.

Je nutná takřka u všech technických materiálů, z důvodu, že díky ní získáváme základní hodnoty potřebné pro výpočet konstrukčních prvků a volbu vhodného materiálu.

Zkoušky tahem se zpravidla nedělají přímo na vyrobené součásti, ale na zkušebních tyčích, které mají tvar a rozměry podle normy. Počáteční délka L_0 zkušební tyče závisí na průřezu zkušební tyče a je při kruhovém průřezu u dlouhé tyče $10 d_0$ a u tyče krátké $5 d_0$ (d_0 = průměr zkušební tyče). Z důvodu, abychom mohli změřit prodloužení zkušební tyče po přetržení,

vyznačíme na ní před zkouškou rysky ve vzdálenosti 10 mm. Zkouškou tahem zjišťujeme pevnost v tahu, poměrné prodloužení, tažnost a kontrakci (zúžení) zkoušeného materiálu. [2]



zkušební tyč kruhová

zkušební tyč plochá

Obrázek 3 - Zkušební tyče pro zkoušku tahem

Při všech statických zkouškách vzniká v zatížené součásti napětí. Rozeznáváme dva druhy napětí, a to normálové napětí σ a tečné napětí τ . Běžně jsou používány hodnoty smluvních napětí, protože zatížení vztahujeme na původní průřez S_0 .

Pevnost v tahu (mez pevnosti v tahu) R_m je smluvní hodnota napětí daného podílem největší zatěžující síly F_m , kterou snese zkušební tyč, a počátečního průřezu zkušební tyče S_0 :

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

Byla-li počáteční délka zkušební tyče L_0 a konečná délka po přetržení L_u , je celkové (absolutní) prodloužení (změna délky)

Poměrné prodloužení ε je dáno poměrem změny délky ΔL k počáteční délce zkušební tyče L_0 :

$$\Delta L = L_u - L_0$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_u - L_0}{L_0}$$

Tažnost A je poměrné prodloužení vyjádřené v procentech počáteční délky:

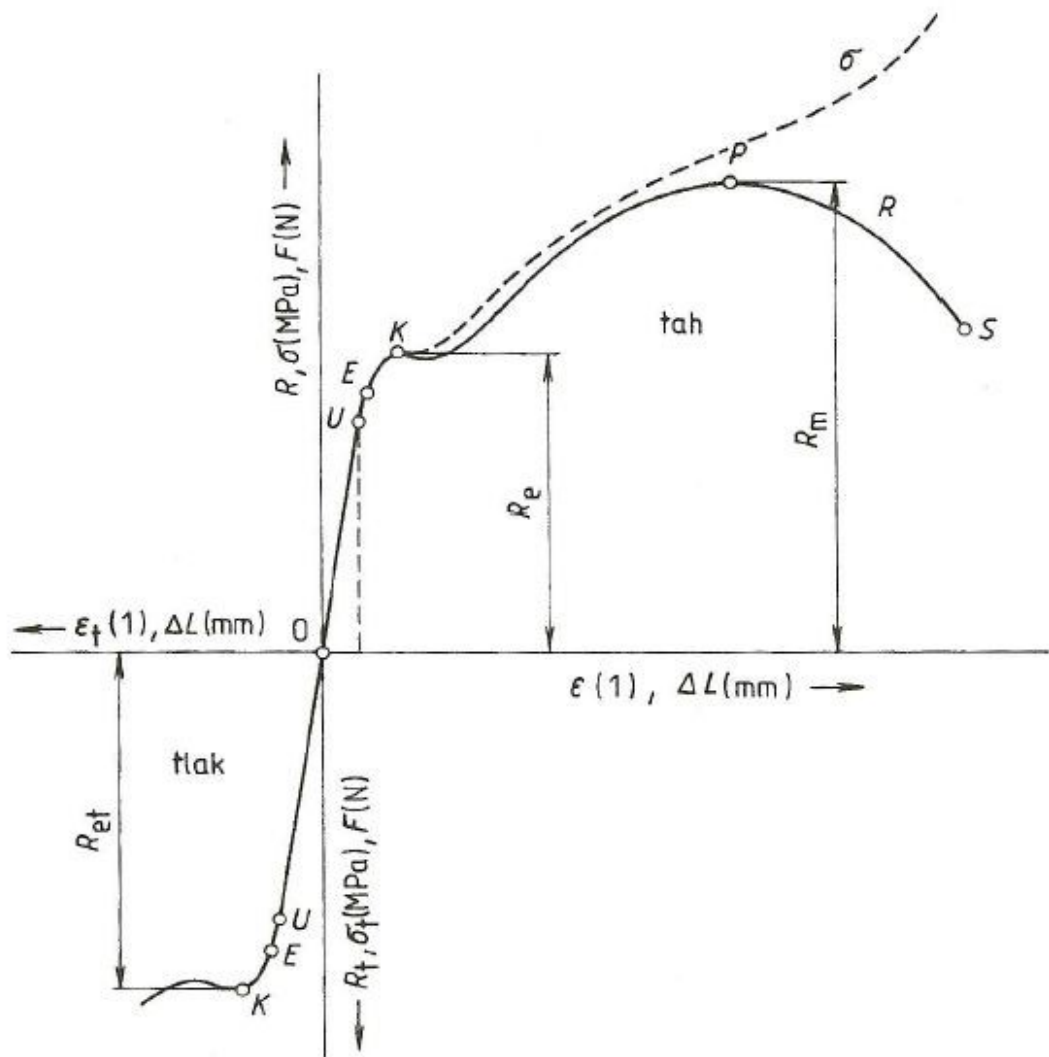
$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (\%)$$

U tažnosti uvádíme indexem (A_5 , A_{10}), zde byla získána na krátké či dlouhé zkušební tyči.

Kontrakce (zúžení) Z je poměr rozdílu počáteční plochy S_0 a nejmenší plochy S_u příčného průřezu zkušební tyče po přetržení k počáteční ploše průřezu:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 \quad (\%)$$

Při zkoušce tahem kreslí zapisovací zařízení trhacího stroje na milimetrový papír upnutý na buben, pracovní diagram, který udává závislost poměrného prodloužení ε na napětí R (nebo celkového prodloužení ΔL na zatěžující síle F). Pro výpočty namáhání má význam pouze diagram $\varepsilon - R$ (prodloužení – napětí). [2]



Obrázek 4 - Pracovní diagram zkoušky tahem a tlakem u měkké nelegované oceli
Zpočátku je prodloužení ty přímo úměrné vzrůstajícímu zatížení (průběh lze znázornit přímkou), a to až do bodu U. Napětí odpovídající bodu U definujeme jako napětí, při němž je prodloužení ještě přímo úměrné napětí (Hookův zákon).

V dalším průběhu zkoušky přestává být prodloužení přímo úměrné zatížení. Až do bodu E je deformace pružná, tj. po odlehčení nabývá tyč počáteční délky. Napětí odpovídající bodu E je mez pružnosti a definujeme ji jako mezní napětí, které po odlehčení nevyvolává trvalé deformace.

Zvětšuje-li se zatížení dál, nastává přetváření trvalé (plastické) a tyč po odlehčení nena-bude počáteční délky. Napětí odpovídající bodu K definujeme jako pevnost v kluzu (mez kluzu v tahu) R_e . Je to napětí, při němž se zkušební tyč počne výrazně deformovat, aniž by

se zvyšovala zatěžující síla, nebo při němž nastává deformace provázená poklesem zatěžující síly.

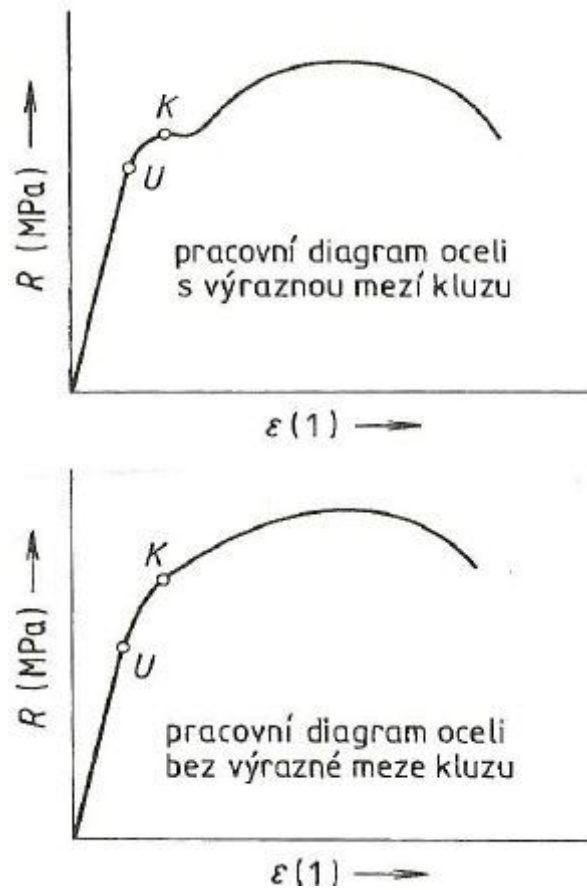
$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad (\text{MPa})$$

U některých materiálů výrazná prodleva nenastane. Potom zavádíme smluvní mez kluzu, kterou určujeme z trvalé deformace pod zatížením R_p . Je to napětí, při kterém trvalá deformace zkušební tyče dosáhne předepsané hodnoty vyjádřené v % počáteční měrné délky (např. 0,2 % - $R_{p 0,2}$).

$$R_{p 0,2} = \frac{F_{p 0,2}}{S_0} \quad (\text{MPa})$$

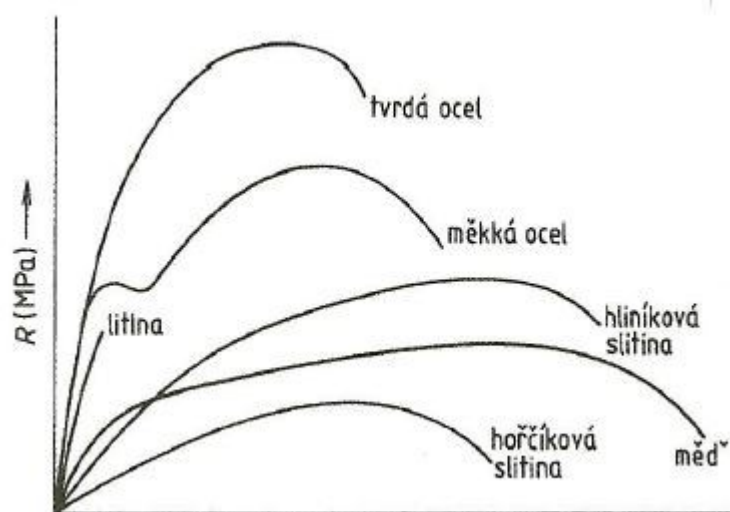
Zjišťujeme ji buď graficky, nebo měřicím zařízením (průtahoměry).

Od bodu K jde čára diagramu téměř vodorovně, aniž vzrůstá zatížení (kov jako by tekl, tyč se prodlužuje). Někdy se objeví i malý pokles napětí. Při dalším zvětšování zatížení se zkušební tyč prodlužuje mnohem rychleji, než vzrůstá zatížení. Bodu P na vrcholu křivky odpovídá největší napětí R_m – mez pevnosti v tahu (pevnost v tahu). Při napětí odpovídajícím bodu S se zkušební tyč přetrhne. [2] [18]



Obrázek 5 - Pracovní diagram oceli s výraznou mezí kluzu a oceli bez výrazné meze kluzu

Tvar pracovního diagramu se mění podle druhu materiálu.



Obrázek 6 - Pracovní diagram pro různé pracovní materiály

2.3 Mechanické zkoušky dynamické

V praxi jsou většinou strojní součásti namáhány zatížením, jehož velikost a smysl se prudce nebo opakovaně mění. Pokud potřebné údaje o chování takto namáhaného materiálu nemůžeme zjistit statickými zkouškami, zjišťujeme zkouškami dynamickými. Při tomto namáhání dochází často k náhlému porušení součásti, i když zatěžující síla ještě nedosáhla statické pevnosti materiálu. [2]

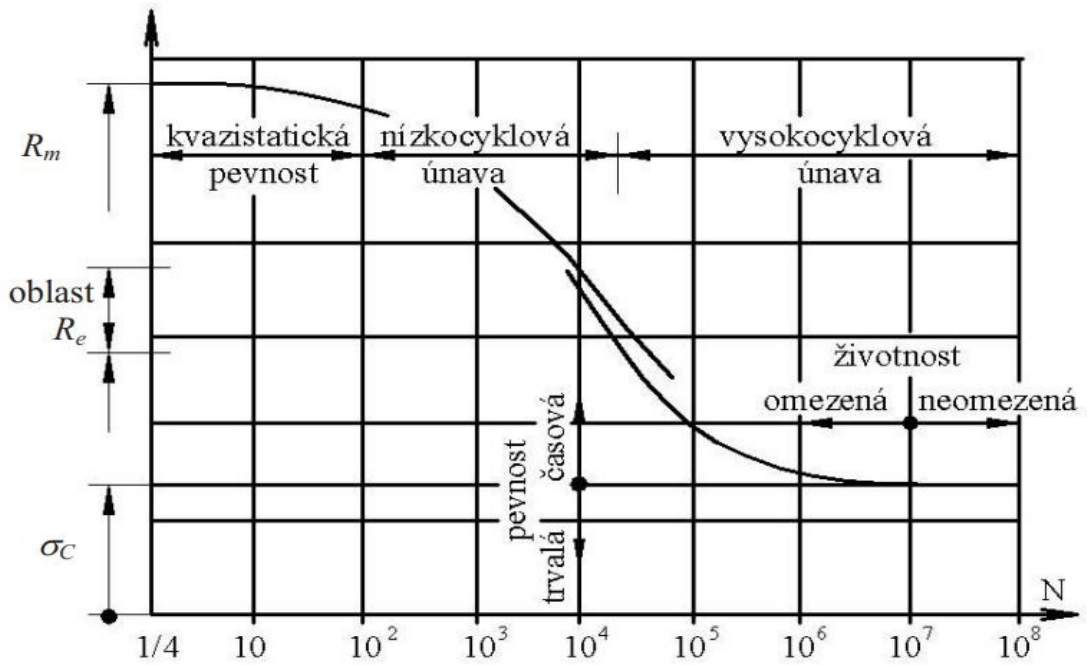
2.3.1 Zkouška opětovným namáháním

Nazýváme je také jako cyklické únavové zkoušky neboli zkoušky únavy materiálu a ty nám dávají opět jiný pohled o chování kovů. Při namáhání součástí vznikají často poruchy dříve, než namáhání odpovídá jeho statické pevnosti. Tomuto jevu se říká únava materiálu.

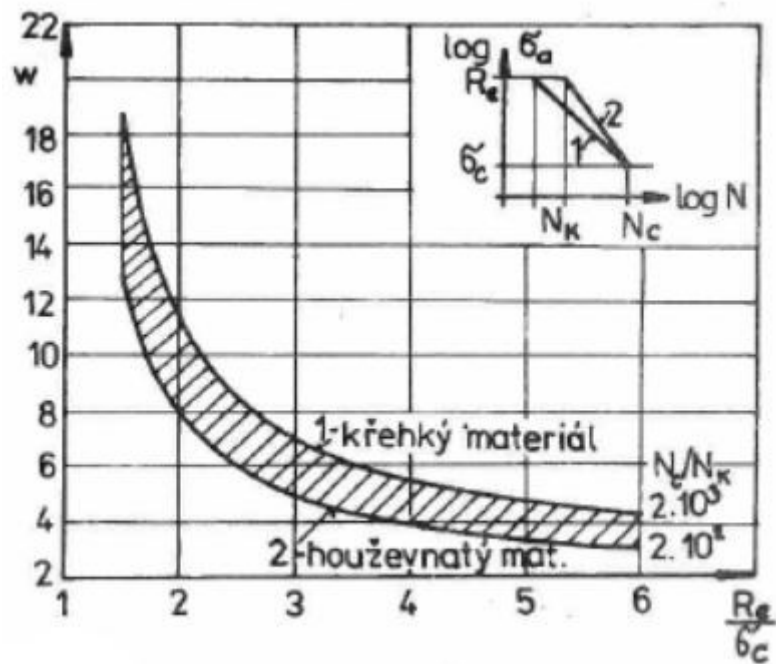
Při zjišťování meze únavy je součást namáhána napětím cyklickým, tj. napětím měnícím se periodicky od horní hodnoty po dolní hodnotu. Zatěžovací cyklus neboli perioda je průběh napětí za jednu dobu kmitu. Doba kmitu je nejmenší časový úsek, za který se opakuje týž průběh namáhání.

Mez únavy zjišťujeme na speciálních zkušebních strojích. Pro střídavé napětí souměrné a nesouměrné stanovíme mez v kombinaci tah – tlak (σ_c), v ohybu (σ_{co}) a v krutu (τ_c). Při napětí pulsujícím a míjivém určujeme mez únavy v tahu, ohybu a krutu. Provedení těchto zkoušek a velikost a tvar tyčí určuje norma ČSN 42 0363.

Pro tyto zkoušky se používá několika stejných zkušebních tyčí ze zkoušeného materiálu a zatěžují se jedním z uvedených způsobů. U první tyče volíme napětí něco málo pod mezí kluzu a po porušení tyče se odečte příslušný počet cyklů změn zatížení. U dalších tyčí volíme stále nižší napětí, takže se dosáhne většího počtu cyklů před porušením. Těmito body se proloží křivka udávající závislost mezi napětím a počtem cyklů, která se nazývá Wöhlerova křivka.



Obrázek 7 - Únavová křivka napětí



Závislost exponentu Wöhlerovy křivky na poměru meze kluzu k mezi únavy (hodnoty R_e, σ_c volit podle druhu namáhání - tah, ohyb, krut)

Obrázek 8 - Wöhlerova křivka

Tato křivka se po určitém počtu cyklů blíží asymptoticky k napětí, které je mezi únavy σ_c . Mez únavy σ_c (MPa) definujeme jako největší napětí, při kterém součást zhotovená z tohoto materiálu vydrží teoreticky neomezený počet cyklů změn zatížení. Pro většinu konstrukčních ocelí je možné pro odhad σ_c vycházet ze vztahu $\sigma_c \approx (0,33 \text{ až } 0,43) R_m$. Pro nelegované oceli lze použít $\sigma_c \approx 0,38R_m$. Únava materiálu souvisí nejen s jeho vlastnostmi, ale i se stavem jeho povrchu. Drsnost, vruby, povrchová koroze apod. nám snižují mez únavy. Leštění, povrchové tvrzení nebo mechanické zpevnění povrchu naopak zvyšují mez únavy. [2]

2.4 Zvláštní technické zkoušky

Podle teplot, při kterých zkoušky provádíme, je dělíme na zkoušky za normálních teplot, zvýšených teplot a snížených teplot. Mechanické zkoušky většinou neprovádíme na součásti samé, ale na zvláštních vzorcích, které jsou zhotoveny buď přímo ze součásti, nebo z téhož materiálu. Podrobné údaje o mechanických zkouškách obsahují příslušné normy, výběr je v literatuře. [2]

2.4.1 Zkoušky za snížených teplot

Chování kovů za snížené teploty je opakem chování za teploty zvýšené. Pevnost vzrůstá, zmenšuje se však tažnost a houževnatost. Praktickou důležitost mají tyto zkoušky např. pro materiály vozidel, kde teplota okolí může klesat až na -50°C , nebo u materiálů pro kompresory a čerpadla (až -180°C). Důležité jsou tyto zkoušky u materiálů pro zařízení a přístroje určené k dosažení velikých výšek (letadla, střely, družice). Nejčastější zkouškou je **zkouška tahem při určité teplotě**. Definice a rozměry jsou obdobné jako u zkoušky tahem za normální teploty, připisuje se jen teplota, při níž se zkouška koná, např. $R_m/-100 = 200 \text{ MPa}$ (pevnost v tahu při teplotě -100°C). Kromě zkoušky tahem se provádí i zkouška vrubové houževnatosti. [2],[11]

3 OCELI

Nejdůležitější a v průmyslu nejpoužívanější jsou technické slitiny, v nichž převládá železo. Je to slitina železa s uhlíkem a jinými prvky, která se používá v technické praxi. Dělíme ji na surová železa a oceli. Pro své mechanické a technologické vlastnosti je ocel dodnes jedním z nejdůležitějších technických materiálů. Její materiálová všestrannost je vynikající pro stavbu strojů, zařízení, nástrojů apod. a vede k výrobě oceli o nejrůznějších vlastnostech. [2],[3],[12]

3.1 Oceli tř. 11

Mají předepsanou čistotu, zaručenou pevnost v tahu, mez kluzu a tažnost. Někdy se zaručují i jiné vlastnosti. Vyžaduje se od nich, aby nebyly náchylné k lámavosti za studena i za červeného žáru. Jsou odstupňovány podle obsahu uhlíku, s nejmenší pevností v tahu od 280 MPa do 900 MPa. Jsou dodávány ve formě tvářených profilů, drátů, plechů, výkovků a výlisků. [2],[13],[14],[15]

3.1.1 Oceli pevnostní řady 34 až 45

Mají max. obsah C = 0,24 %, většinou jsou zaručeně svařitelné, dobře tvárné za studena i za tepla. Vyrábějí se z nich výlisky, výkovky, výtažky. Nejvýznamnější a nejrozšířenější jsou oceli 11 343, 11 373, 11 423, ze kterých se vyrábějí veškeré druhy polotovarů. Používají se na svařované konstrukce strojů, které jsou namáhány staticky popř. mírně dynamicky (čepy, páky, svorníky, pouzdra, součásti parních kotlů (11 364.1)) a vodních turbín (11 373, na hřídele, osy, ozubená kola, železniční vozidla (11 423)). Některé oceli 11 369, 11 419 se hodí na součásti pro nízké teploty (do -50°C). [2], [7],[12]

3.2 Oceli tř. 17

Středně vysoko legované oceli. Rozdělení na korozivzdorné, žárovzdorné, žárovevné, odolné proti opotřebení, pro nízké teploty, se zvláštními fyzikálními vlastnostmi. Odlišné označování této třídy vedlo ke zlepšení orientace díky vyjádření chemického složení, tedy označování procenty uhlíku a legujících prvků. Dle ČSN je až 50 druhů těchto ocelí. Většinou jsou určeny pro součásti a zařízení v potravinářském, farmaceutickém a chemickém průmyslu. [2],[12][13],[14],[15]

4 PŘEHLED TECHNOLOGIE – SVAŘOVÁNÍ

Svařováním vznikají pevná a nerozebíratelná spojení kovových součástí. Jejich výhodou je těsnost a trvanlivost. Zvyšuje se produktivita práce, zmenšuje se spotřeba konstrukčního materiálu, zjednodušuje se konstrukce a podstatně se zkracují výrobní časy. Používá se téměř ve všech oborech. Svařované součásti nahrazují odlitky a výkovky. Nevýhodou je nerozebíratelnost spojů a potřeba kvalifikovaných pracovníků. [4],[6]

4.1 Svařitelnost

Kovy, které navzájem svařujeme, musí být svařitelné. Svařitelnost je tedy schopnost materiálu vytvořit svarem spojení požadované jakosti. [4]

4.1.1 Plamenové svařování

U plamenového svařování používáme jako zdroje tepla plamene, který vzniká spalováním acetylénu. Místo acetylénu lze používat i jiných hořlavých plynů (vodík, svítiplyn, propan-butan aj.). Plamenem lze svařovat téměř všechny kovy železné i neželezné. [4]

4.1.2 Svařování elektrickým obloukem

Při svařování elektrickým obloukem je zdrojem tepla elektrický oblouk, který vznikne mezi elektrodou a svařovaným předmětem nebo mezi dvěma elektrodami, když je zapojíme na vhodný elektrický zdroj. Používáme stejnosměrného nebo střídavého proudu o napětí 10 až 70 V a o intenzitě 30 až 500 A i více. Nelze proto odebírat přímo ze sítě (230 nebo 400 V), ale ze svařovacího agregátu (tj. třífázový motor a dynamo – motorgenerátor), který dává stejnosměrný proud, nebo z transformátoru na střídavý proud. [4]

5 POVRCHOVÁ ÚPRAVA MATERIÁLU

Kovy a slitiny jsou spolehlivým pomocníkem člověk. Vyžadují však pečlivé ošetřování, neboť stykem s korozním prostředím se rozrušují – korodují.

Koroze začíná obvykle na povrchu kovového předmětu a postupuje dovnitř materiálu. Na povrchu vznikají produkty koroze, které již nemají kovový vzhled, ani vlastnosti kovů. U některých kovů (např. zinku, olova, mědi aj.) oxiduje je povrch, neboť povlak vzniklý oxidací chrání spodní vrstvy kovu před další oxidací. U jiných kovů (např. železa) pokračuje oxidace dále, až se všechnen kov rozruší. Prakticky nejsou kovy a slitiny, které by korozi nepodléhali. [5]

5.1 Ochrana proti korozi

Proti korozi můžeme chránit součásti různým způsobem. Velmi častá je ochrana povrchu kovovými nebo nekovovými povlaky. Kovové povlaky získáváme buď namáčením v roztavených kovech, galvanickým pokovováním nebo stříkáním (metalizace).

Nekovové povlaky mohou být organické (nátěrové hmoty a konzervační prostředky) nebo anorganické (např. keramické smalty). Velmi slibnou ochranou kovových součástí jsou plastické materiály, které jsou velmi trvanlivé. Získáváme je nanášením ve formě prášků a natavováním nebo stříkáním. [5] [8]

5.1.1 Žárové zinkování

Nejrozšířenější způsob ochrany proti atmosférickým vlivům. Zinkování se provádí u plechů, pásů, drátů, řetězů, konstrukcí, odlitků aj. [5]

6 OCELI DO NÍZKÝCH A KRYOGENNÍCH TEPLOT

Na počátku 20. století nastal největší vývoj nízkoteplotních ocelí. Hlavním důvodem byla nutnost nalezení vhodných materiálů pro skladování a dopravu zkapalněných plynů. Podle minimální pracovní teploty můžeme konstrukční materiály pracující v oblasti kryogenních teplot rozdělit do tří skupin. [17]

- 1) Konstrukční jemnozrné mikrolegované oceli.
- 2) Nízkolegované oceli s obsahem niklu od 2,5 do 6 %.
- 3) 9% Ni oceli martenziticky vytvrditelné, manganové oceli, austenitické oceli CrNi, či MnCr oceli a slitiny.

6.1 Korozivzdorné oceli do nízkých teplot

Nejvhodnějším materiálem jsou austenitické korozivzdorné oceli. Základní představitel je ocel typu Cr18Ni10 (AISI 304). Austenitické oceli můžeme dělit stabilní a nestabilní podle toho, zdali u nich vlivem působení deformace a poklesu teploty dochází k martenzitické přeměně nebo si zachovávají austenitickou strukturu. [17]

6.2 Uhlíkové oceli do nízkých teplot

V celé řadě případů se vzhledem k pevnostním vlastnostem a ceně používá vybraných uhlíkových nebo nízkolegovaných ocelí. Mohou se použít například jemnozrné oceli dokonale uklidněné uhlíkem nebo jemnozrné nízkolegované oceli. Uhlíkové oceli do nízkých teplot se vyznačují nízkým obsahem uhlíku a jemnou strukturou. [17]

7 ZAMRAŽOVACÍ TUNELY

Zamrazovací tunely pracují na principu šokového zamrazování produktu. Produkt, který je do tunelů přivážen v papírových kartonech, nerezových vaničkách uložených v přepravních rámech nebo klecích, popř. produkt, který je zavěšen na háku a dopraven po pojezdové dráze, musí být před uložením do mrazírenských skladů šokové zamrazen v horizontu 24 hodin. Důvodem je zabránění znehodnocení produktu.

7.1 Odstávky, sanitace, údržba

Odstávky jednotlivých nebo více tunelů probíhají dle situace, jak si to žádá výroba nebo údržba. V tunelech se vypne chlazení a teplota se postupně zvyšuje z -40°C až na 0°C (samovolně nebo elektrickými topidly). Odstávky se provádí z důvodu sanitace, osekání ledu, údržby chlazení, popřípadě údržbě stavební či zámečnické. Sanituje se tlakovou vodou a díky tomu může dojít na částech konstrukce k porušení povrchové úpravy a vzniká koroze. Údržba chlazení se pohybuje na pochozích lávkách upevněných ke konstrukci, na lávkách je ocelový pochozí rošt. Údržba se také pohybuje pod konstrukcí z důvodu různých opravy, které si žádá situace.

7.2 Bezpečnost práce

Péče o bezpečnost a ochranu zdraví při práci (BOZP) a stálé zlepšování pracovních podmínek je rovnocennou a neoddělitelnou součástí plnění a ostatních pracovních úkolů i rozvoje techniky. Na péči o BOZP se podílí: zaměstnavatel, stát, odbory. [4][9]

Z důvodů odstávek, při kterých se v tunelech mění teplota a díky sanitaci tlakovou vodou bude prověřeno, zdali je a bude bezpečné se v tunelech i nadále pohybovat a manipulovat s produkty, případně i ve visu po drahách a pomocí vysokozdvíhových vozíků nebo ručně vedených paletových vozíků.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

8 VÝBĚR MATERIÁLU A VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Pro testování těles v praktické části jsem zvolil tělesa z nerezové oceli, konkrétně ocel 17 240 (1.4301). Tělesa byla rozdělena do dvou skupin podle průřezu. Jedna skupina byla vyrobena z tyče kruhového průřezu, druhá skupina byla vyrobena z ploché tyče obdélníkového průřezu.

8.1 Příprava zkušebních těles

Obě skupiny těles byly rozděleny na poloviny. Jedna polovina byla ponechána, aby měla pokojovou teplotu (teplotu v dílně), tedy cca 20°C. Vzhledem k tomu, že ke zkušebnímu stroji nemohla být připojena teplotní komora, druhá polovina těles byla umístěna do mrazáku, kde byla ponechána 1 týden při teplotě -30°C.

8.2 Rozměry zkušebních těles

8.2.1 Zkušební tělesa z tyče kruhového průřezu

Tyč byla rozřezána na stejně dlouhé kusy, průřez byl po celé délce konstantní.

Tabulka 1 - Rozměry tělesa kruhového průřezu

Délka L [mm]	průměr d [mm]
150	12



Obrázek 9 - Zkušební těleso kruhového průřezu

8.2.2 Zkušební tělesa z ploché tyče obdélníkového průřezu

Tyč byla rozřezána na stejně dlouhé kusy, průřez byl po celé délce konstantní.

Tabulka 2 - Rozměry tělesa obdélníkového průřezu

Délka L [mm]	šířka [mm]	tloušťka t [mm]
120	30	3



Obrázek 10 - Zkušební těleso obdélníkového průřezu

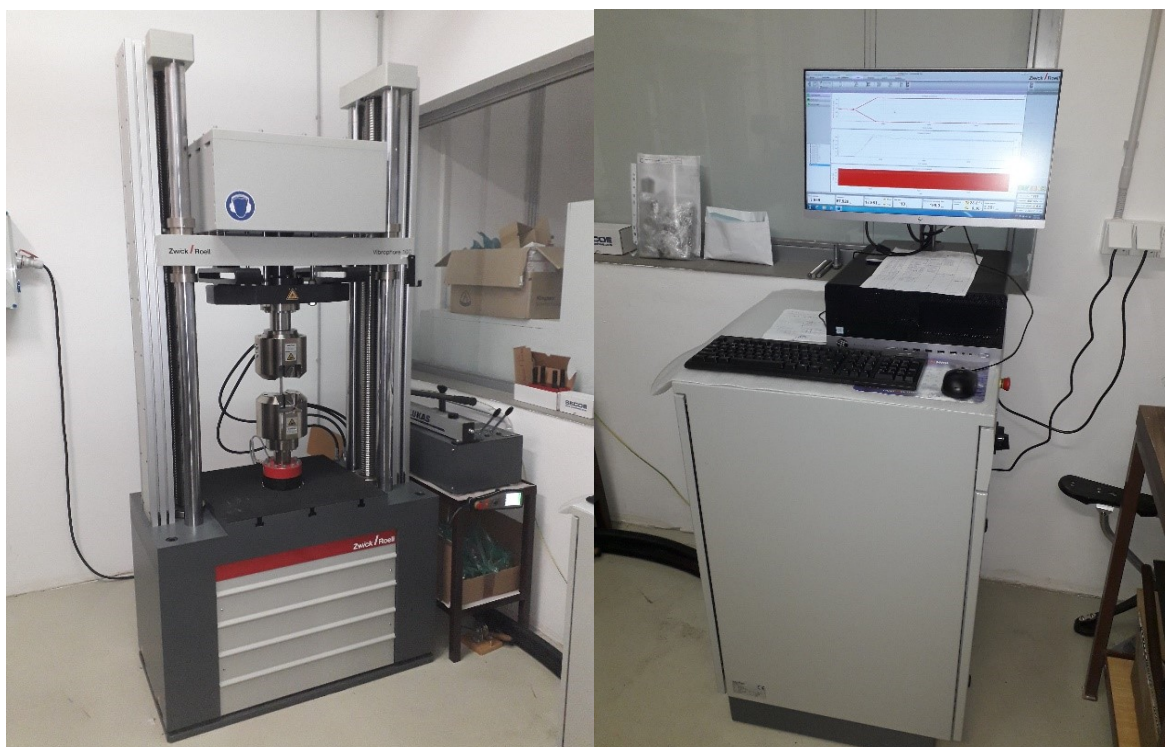
9 MECHANICKÉ ZKOUŠKY TĚLES

Na zkušebních tělesech byla nejprve provedena statická zkouška tahem. Zkouška byla provedena dle normy ČSN EN 10002-1 (42 0310):1994. Jediný rozdíl byl v ponechání konstantního průřezu tělesa v celé jeho délce.

Jako další byla provedena cyklická únavová zkouška podle normy ČSN 42 0363. I v tomto případě byl průřez tělesa konstantní po celé jeho délce.

9.1 Zařízení pro provedení zkoušek

Měření probíhalo v prostoru dílen budovy U5 na Fakultě aplikované informatiky UTB ve Zlíně. Pro provedení obou zkoušek byl zvolen zkušební dynamický vibrační stroj Zwick/Roell Vibrophore 100. Stroj je určen pro dynamické testování a zjišťování únavové životnosti, může ale také být použit pro statické testování.



Obrázek 11 - Stroj Zwick/Roell Vibrophore 100

Tabulka 3 - Parametry zkušebního stroje Zwick/Roell Vibrophore 100 [1]

Maximální síla:	100 kN
Maximální amplituda síly:	50 kN
Maximální oscilační posun:	4 (± 2) mm
Testovací frekvenční rozsah:	(30 – 285) Hz
Maximální testovací výška:	2005 mm
Testovací SW:	testXpert R

9.2 Statická zkouška tahem

Jedná se o zkoušku jednoosým tahem, díky níž byly po přetržení zkoušeného tělesa zjištěny potřebné charakteristiky materiálu jako jsou modul pružnosti v tahu, mez kluzu, mez pevnosti, a maximální tahová síla. Z výsledné průměrné maximální síly se poté určila hodnota zatížení pro cyklické zkoušky.

9.2.1 Zkouška tahem pro tělesa s obdélníkovým průřezem při teplotě 20°C a -30°C

Těleso bylo uchyceno v čelistech do 2/3 jejich výšky, aby byla pokryta dostatečně velká plocha a těleso při zkoušce nevyklouzlo nebo nebylo vytrženo z čelistí. Délka mezi čelistmi byla 970 mm. Ze skupiny těles s obdélníkovým průřezem byla testována 3 tělesa při teplotě v dílně, tedy okolo 20°C a 3 tělesa, která byla v mrazáku a měla teplotu -30°C.



Obrázek 12 - Zkoušené těleso před a po přetržení

9.2.2 Vyhodnocení naměřených dat

V tabulkách č. 4 – 7 jsou uvedeny a barevně odděleny naměřené hodnoty po zkoušce tahem. Názvy v tabulkách jsou ponechány z testovacího softwaru testXpert. Jedná se o modul pružnosti E , mez pevnosti v tahu R_m , zde uvedenou jako $F_{\{lo\ max\}}$ [MPa], maximální tahovou sílu $F_{\{lo\ max\}}$ [N], která je nezbytná k porušení tělesa. Je zde také uvedena smluvní mez kluzu $R_p\ 0,2$, označena jako $F_{at\ 0,2\%}$, dále síla při přetržení $F_{\{lo\ Break\}}$, poměrné prodloužení ΔL , zde jako $dL_{at\ F_{\{lo\ max\}}}$, uvedené při maximální síle a při přetržení. Ještě zde můžeme vidět práci W , vyvinutou při působení maximální síly a při přetržení. Nakonec jsou v tabulce průřezy nebo průměry těles označeny písmenem d , jejich plocha S a teplota t , kterou měla tělesa na začátku měření. V posledních dvou tabulkách je uvedena průměrná hodnota zatěžující síly $\{ol\ x\}$, směrodatná odchylka s a variační koeficient $\{ny\}\{%\}$.

Tabulka 4 - Získané hodnoty po provedení tahové zkoušky

	$E_{\{lo\ mod\}}$	$F_{\{lo\ max\}}$	$F_{\{lo\ max\}}$	$F_{at\ 0.2\%}$ plastic strain	$F_{at\ 0.2\%}$ plastic strain	$F_{\{lo\ Break\}}$	$F_{\{lo\ Break\}}$	$dL_{at\ F_{\{lo\ max\}}}$
	MPa	N	MPa	N	MPa	N	MPa	mm
tyč plochá	23000	100930	672,89	46000	307	20100	134	33,4
	22800	101090	673,96	48000	320	87200	582	33,9
	22500	101450	676,34	49800	332	90100	601	35,2
	21800	110080	733,86	53700	358	88300	589	42,2
	21900	109250	728,32	51600	344	94100	627	44
	22500	109570	730,47	48900	326	97500	650	45,9

Tabulka 5 - Získané hodnoty po provedení tahové zkoušky

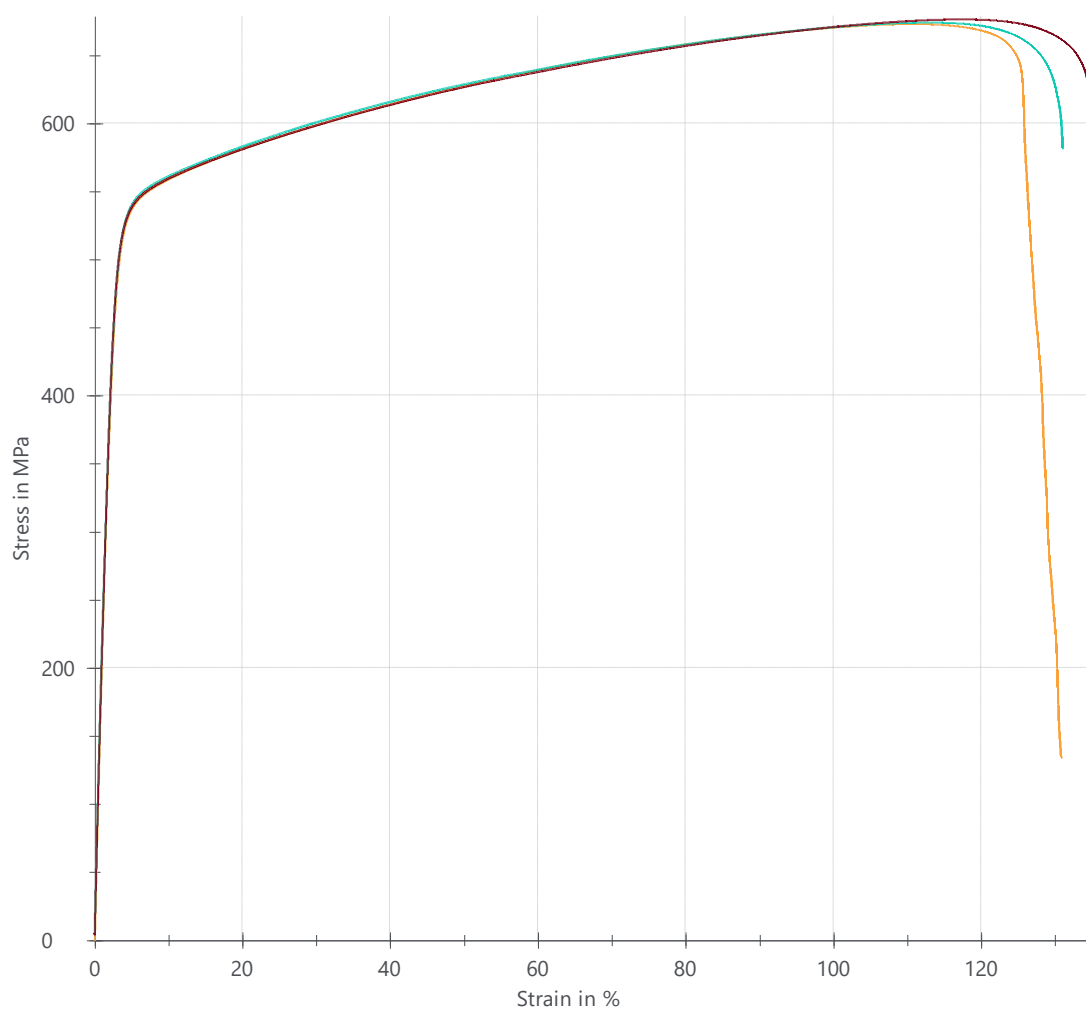
	$dL_{at\ F_{\{lo\ max\}}}$	$dL_{at\ break}$	$dL_{at\ break}$	$W_{to\ F_{\{lo\ max\}}}$	$W_{to\ break}$	$d_{\{lo\ 0\}}$	$S_{\{lo\ 0\}}$	t
	%	mm	%	Nmm	Nmm	mm	mm ²	°C
tyč plochá	111,2	39,2	130,8	3086773	3609479	30 x 5	150	20
	112,9	39,3	131	3146144	3685249	30 x 5	150	20
	117,3	40,4	134,7	3273842	3796209	30 x 5	150	20
	140,5	46,3	154,3	4169034	4615659	30 x 5	150	-30
	146,6	48	160,1	4298940	4735520	30 x 5	150	-30
	153,2	50,1	167,1	4523823	4974677	30 x 5	150	-30

Tabulka 6 - Průměrné hodnoty po provedení tahové zkoušky u tělesa o teplotě 20°C

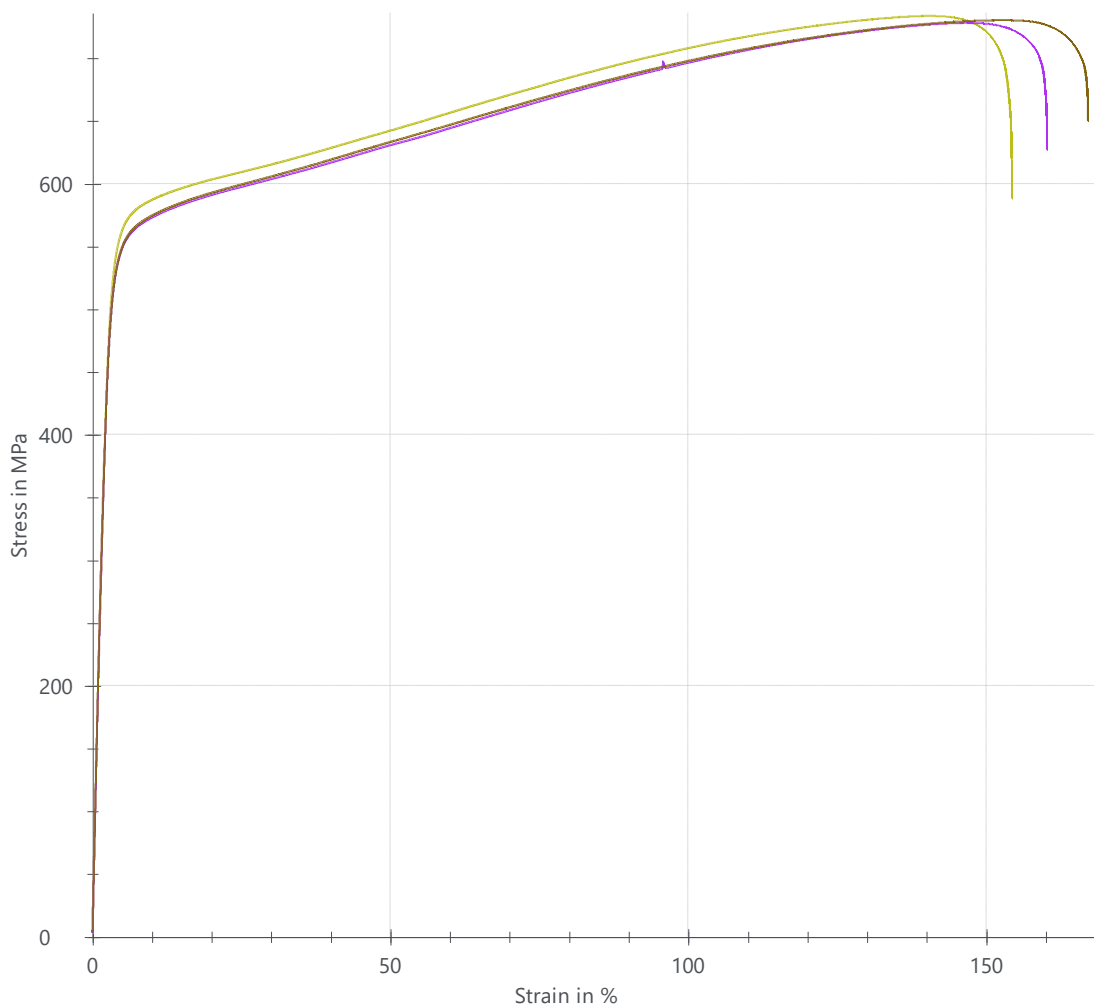
	E{lo mod}	F at 0.2% plastic strain	F{lo max}	F at 0.2% plastic strain	F{lo max}	F{lo Break}	dL at F{lo max}	dL at break	W to F{lo max}	W to break
n = 3	MPa	N	N	MPa	MPa	N	%	mm	Nmm	Nmm
{ol x}	22800	47900	101160	320	674,4	65800	113,8	39,6	3168920	3696979
s	282	1870	264,47	12,4	1,7631	39600	3,2	0,7	95591,44	93915,98
{ny} [%]	1,24	3,89	0,26	3,89	0,26	60,19	2,78	1,66	3,02	2,54

Tabulka 7 - Průměrné hodnoty po provedení tahové zkoušky u tělesa o teplotě -30°C

	E{lo mod}	F at 0.2% plastic strain	F{lo max}	F at 0.2% plastic strain	F{lo max}	F{lo Break}	dL at F{lo max}	dL at break	W to F{lo max}	W to break
n = 3	MPa	N	N	MPa	MPa	N	%	mm	Nmm	Nmm
{ol x}	22100	51400	109630	343	730,88	93300	146,8	48,1	4330599	4775285
s	376	2380	418,75	15,9	2,7916	4670	6,3	1,9	179500,8	182782,4
{ny} [%]	1,71	4,63	0,38	4,63	0,38	5	4,31	3,99	4,14	3,83



Obrázek 13 - Pracovní diagram zkoušky tahem závislosti napětí na poměrné deformaci pro těleso o teplotě 20°C



Obrázek 14 - Pracovní diagram zkoušky tahem závislosti napětí na poměrné deformaci pro těleso o teplotě -30°C

V tabulkách č. 4 a 5 můžeme vidět základní mechanické vlastnosti, ze kterých nás ale nejvíce zajímá maximální tahová síla $F_{\{lo\ max\}}$. Ta nám slouží k odvození zatížení pro následující zkoušku prováděnou cyklováním. Použita bude průměrná síla z tabulky č. 5, tedy $F_{\{lo\ max\}} = 101160\ \text{N}$ z tělesa testovaného při teplotě 20°C . V grafech pod tabulkami jsou vidět hodnoty meze kluzu $R_{p\ 0,2} = 320\ \text{MPa}$ a mez pevnosti $R_m = 674,4\ \text{MPa}$.



Obrázek 15 - Přetržená tělesa obdélníkového průřezu po tahové zkoušce – vlevo jsou tělesa zkoušená při teplotě 20°C, vpravo při -30°C

9.2.3 Zkouška tahem pro tělesa s kruhovým průřezem při teplotě 20°C a -30°C

I v tomto případě bylo těleso bylo uchyceno v čelistech do 2/3 jejich výšky, aby byla pokryta dostatečně velká plocha a těleso při zkoušce nevyklouzlo nebo nebylo vytrženo z čelistí. Délka mezi čelistmi zde byla 990 mm. Ze skupiny těles s kruhovým průřezem byla testována 3 tělesa při teplotě v dílně, tedy okolo 20°C a 3 tělesa, která byla v mrazáku a měla teplotu -30°C.



Obrázek 16 - Zkoušené těleso před a po přetržení

9.2.4 Vyhodnocení naměřených dat

V tomto případě můžeme vidět v tabulkách č. 8 – 11 naměřené hodnoty po zkoušce tahem se stejnými názvy jako ve zkoušce předešlé. Opět je zachováno barevné rozlišení a názvy v tabulkách jsou ponechány z testovacího softwaru testXpert. Jedná se tedy o modul pružnosti E , mez pevnosti v tahu R_m , zde uvedenou jako $F \{lo\ max\}$ [MPa], maximální tahovou sílu $F \{lo\ max\}$ [N], která je nezbytná k porušení tělesa. Dále je zde, samozřejmě, uvedena smluvní mez kluzu $R_p\ 0,2$, označena jako $F\ at\ 0,2\%$, dále síla při přetržení $F \{lo\ Break\}$, poměrné prodloužení ΔL , zde jako $dL\ at\ F \{lo\ max\}$, uvedené při maximální síle a při přetržení, práce W , vyvinutá při působení maximální síly a při přetržení. U tohoto případu je uveden v tabulce průměr tělesa označený písmenem d , plocha těles S a teplota t , kterou měla tělesa na začátku měření. V posledních dvou tabulkách je uvedena průměrná hodnota zatěžující síly $\{ol\ x\}$, směrodatná odchylka s a variační koeficient $\{ny\}\%$.

Tabulka 8 - Získané hodnoty po provedení tahové zkoušky

	$E_{\{lo\ mod\}}$	$F_{\{lo\ max\}}$	$F_{\{lo\ max\}}$	F at 0.2% plastic strain	F at 0.2% plastic strain	$F_{\{lo\ Break\}}$	$F_{\{lo\ Break\}}$	dL at $F_{\{lo\ max\}}$
	MPa	N	MPa	N	MPa	N	MPa	mm
tyč kruhová	42100	91093	805,43	51500	456	58600	519	17,5
	42300	91554	809,52	51600	457	56900	504	15,9
	41800	92003	813,48	52800	467	60600	535	18,6
	41400	94717	837,48	54500	482	65000	575	29,7
	41200	94981	839,82	52800	467	62800	555	28,5
	41400	94561	836,1	52800	467	61300	542	27,1

Tabulka 9 - Získané hodnoty po provedení tahové zkoušky

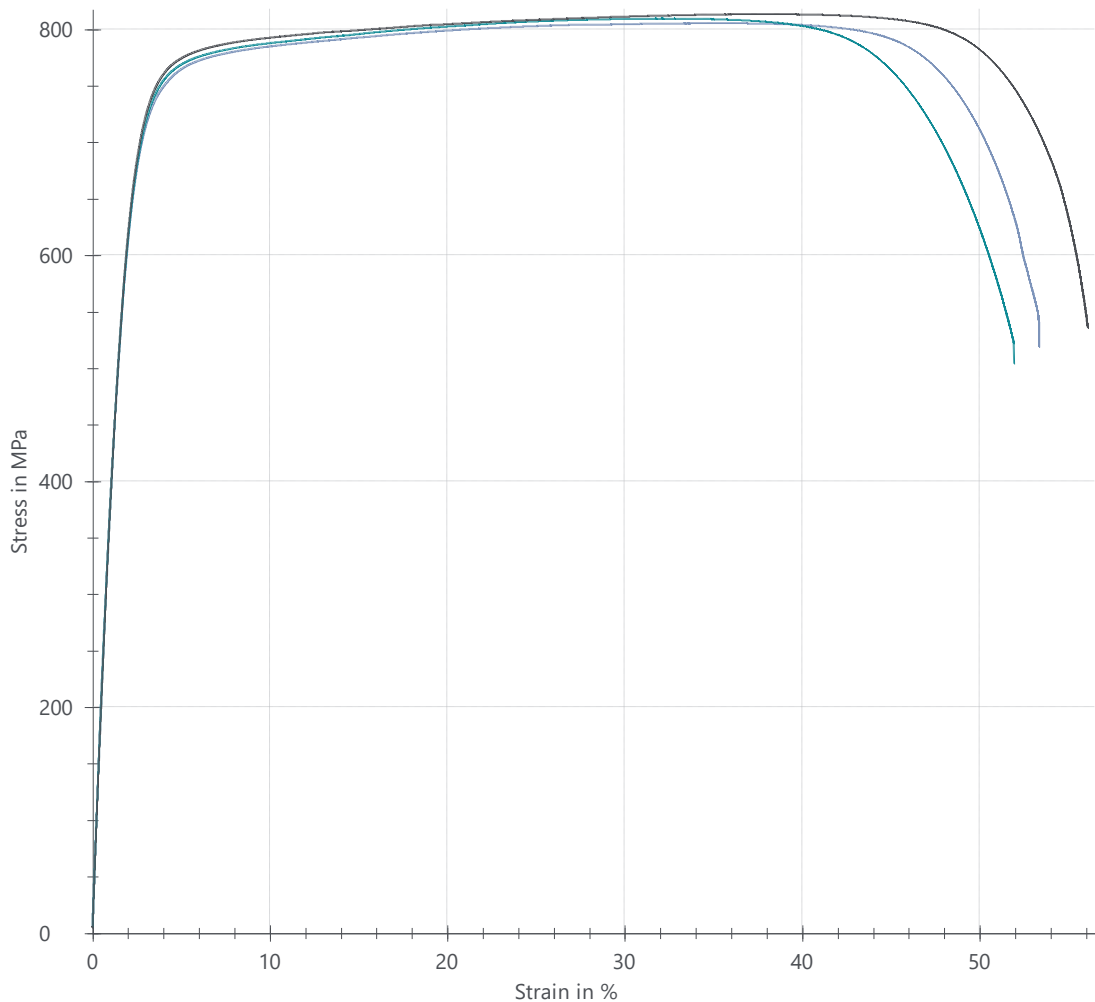
	dL at $F_{\{lo\ max\}}$	dL at break	dL at break	W to $F_{\{lo\ max\}}$	W to break	$d_{\{lo\ 0\}}$	$S_{\{lo\ 0\}}$	t
	%	mm	%	Nmm	Nmm	mm	mm ²	°C
tyč kruhová	35	26,7	53,3	1512185	2301828	12	113,1	20
	31,8	26	51,9	1371427	2232477	12	113,1	20
	37,3	28	56,1	1630437	2452644	12	113,1	20
	59,4	43,5	86,9	2707719	3969627	12	113,1	-30
	57	40,2	80,4	2603206	3669087	12	113,1	-30
	54,2	39,4	78,7	2459766	3572523	12	113,1	-30

Tabulka 10 - Průměrné hodnoty po provedení tahové zkoušky u tělesa o teplotě 20°C

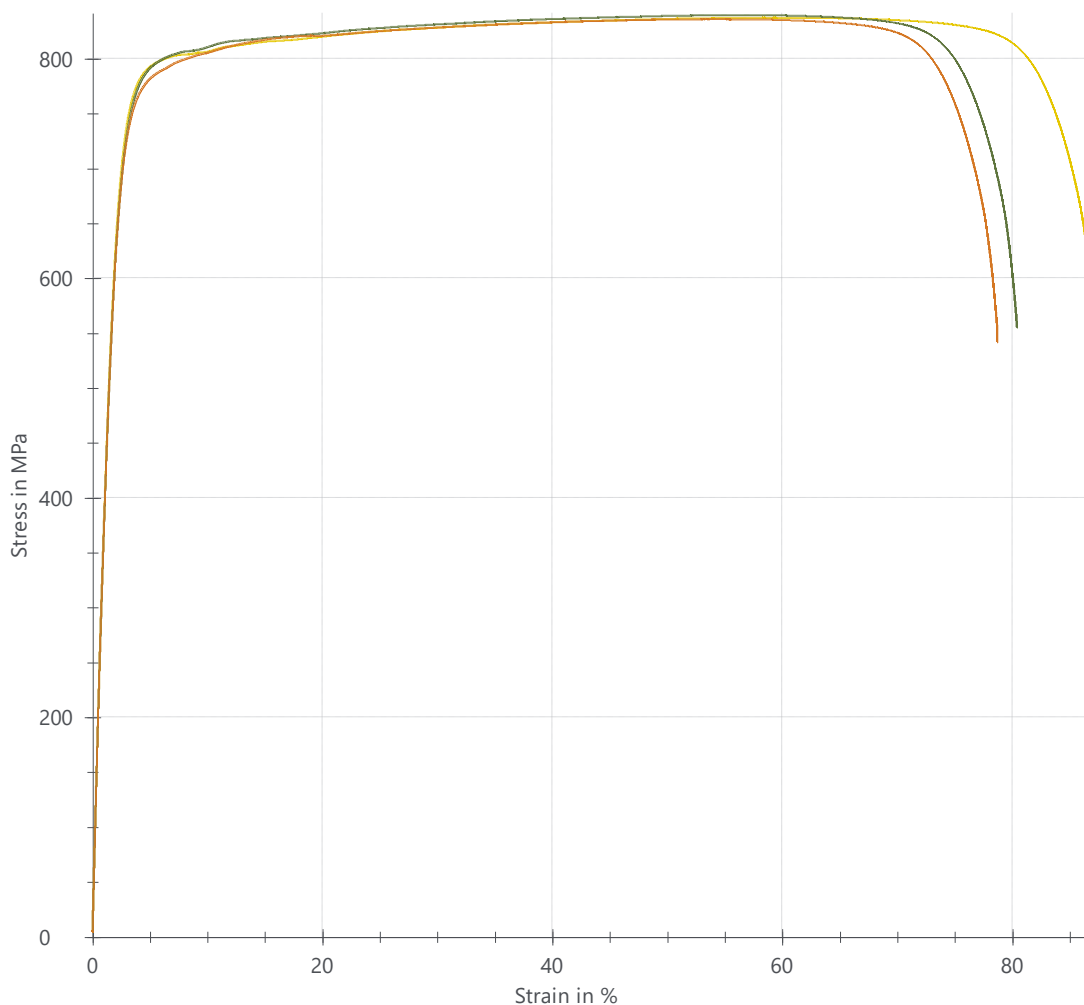
	$E_{\{lo\ mod\}}$	F at 0.2% plastic strain	$F_{\{lo\ max\}}$	F at 0.2% plastic strain	$F_{\{lo\ max\}}$	$F_{\{lo\ Break\}}$	dL at $F_{\{lo\ max\}}$	dL at break	W to $F_{\{lo\ max\}}$	W to break
n = 3	MPa	N	N	MPa	MPa	N	%	mm	Nmm	Nmm
$\{ol\ x\}$	42100	52000	91550	460	809,48	58700	34,7	26,9	1504683	2328983
s	273	704	455,08	6,23	4,0238	1810	2,8	1,1	129668,1	112567,4
$\{ny\}$ [%]	0,65	1,35	0,5	1,35	0,5	3,08	7,99	3,94	8,62	4,83

Tabulka 11 - Průměrné hodnoty po provedení tahové zkoušky u tělesa o teplotě – 30°C

	E{lo mod}	F at 0.2% plastic strain	F{lo max}	F at 0.2% plastic strain	F{lo max}	F{lo Break}	dL at F{lo max}	dL at break	W to F{lo max}	W to break
n = 3	MPa	N	N	MPa	MPa	N	%	mm	Nmm	Nmm
{ol x}	41300	53300	94753	472	837,8	63000	56,9	41	2590230	3737079
s	89,9	971	212,29	8,59	1,8771	1880	2,6	2,2	124485,1	207099,2
{ny} [%]	0,22	1,82	0,22	1,82	0,22	2,98	4,54	5,3	4,81	5,54



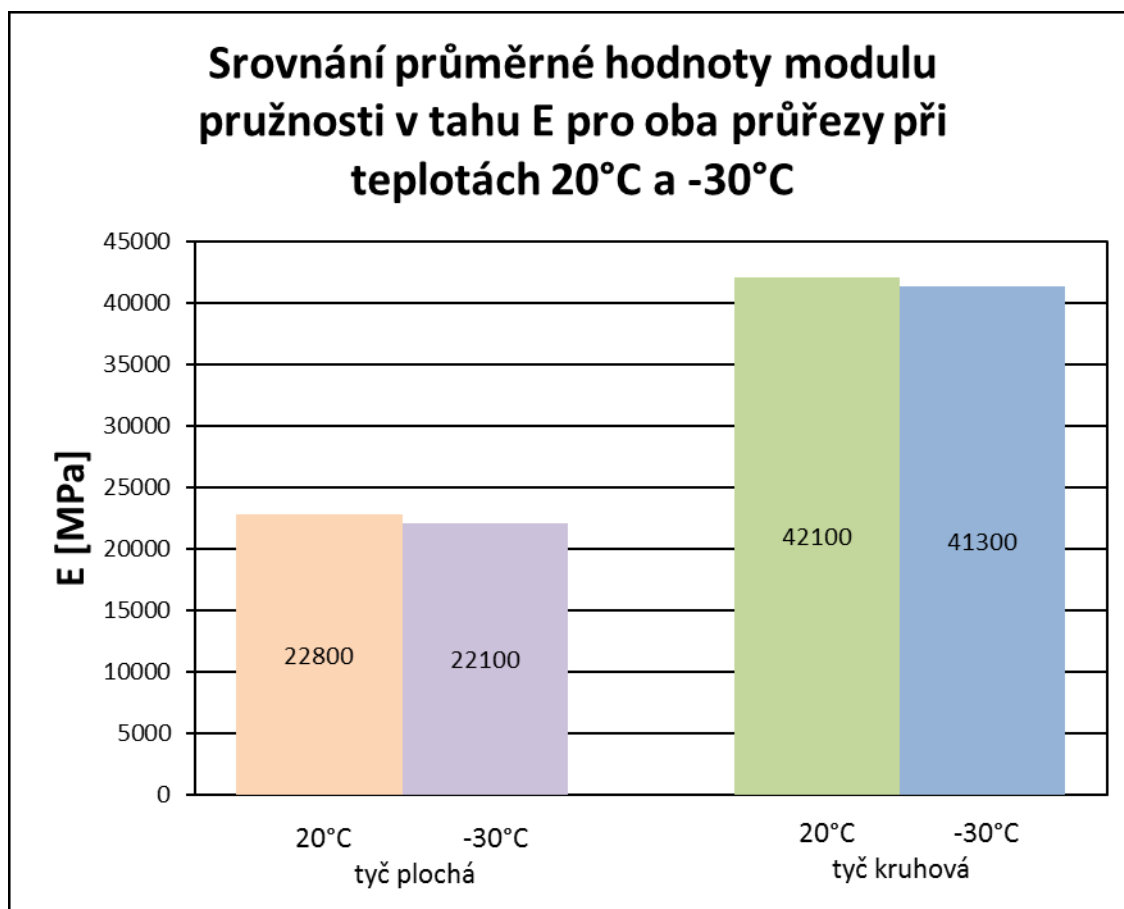
Obrázek 17 - Pracovní diagram zkoušky tahem závislosti napětí na poměrné deformaci pro těleso o teplotě 20°C



Obrázek 18 - Pracovní diagram zkoušky tahem závislosti napětí na poměrné deformaci pro těleso o teplotě -30°C

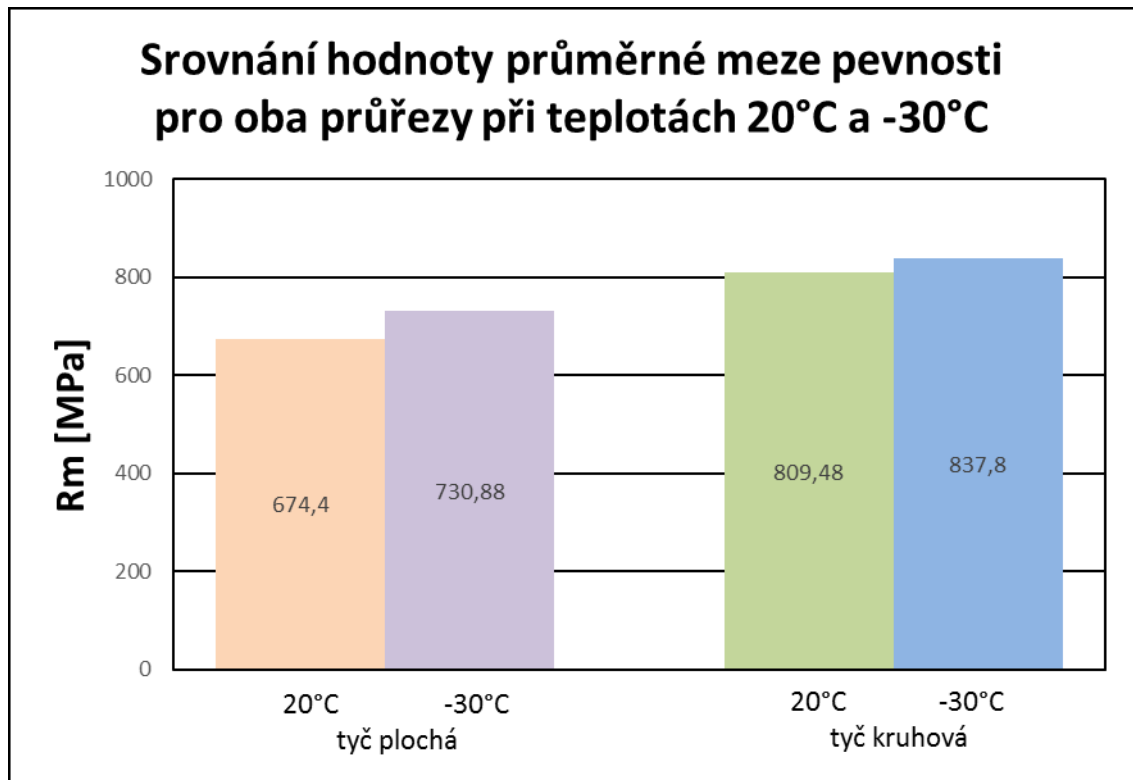
V tabulkách č. 8 a 9 můžeme vidět základní mechanické vlastnosti, ze kterých nás ale opět nejvíce zajímá maximální tahová síla $F_{\text{lo max}}$. Ta nám slouží k odvození zatížení pro následující zkoušku prováděnou cyklováním. Použita bude průměrná síla z tabulky č. 10, tedy $F_{\text{lo max}} = 91550 \text{ N}$ z tělesa testovaného při teplotě 20°C . V grafech pod tabulkami jsou vidět hodnoty meze kluzu $R_{p 0,2} = 460 \text{ MPa}$ a mez pevnosti $R_m = 809,48 \text{ MPa}$.

9.2.5 Srovnání a vyhodnocení základních mechanických vlastností po tahové zkoušce a jejich grafické zobrazení



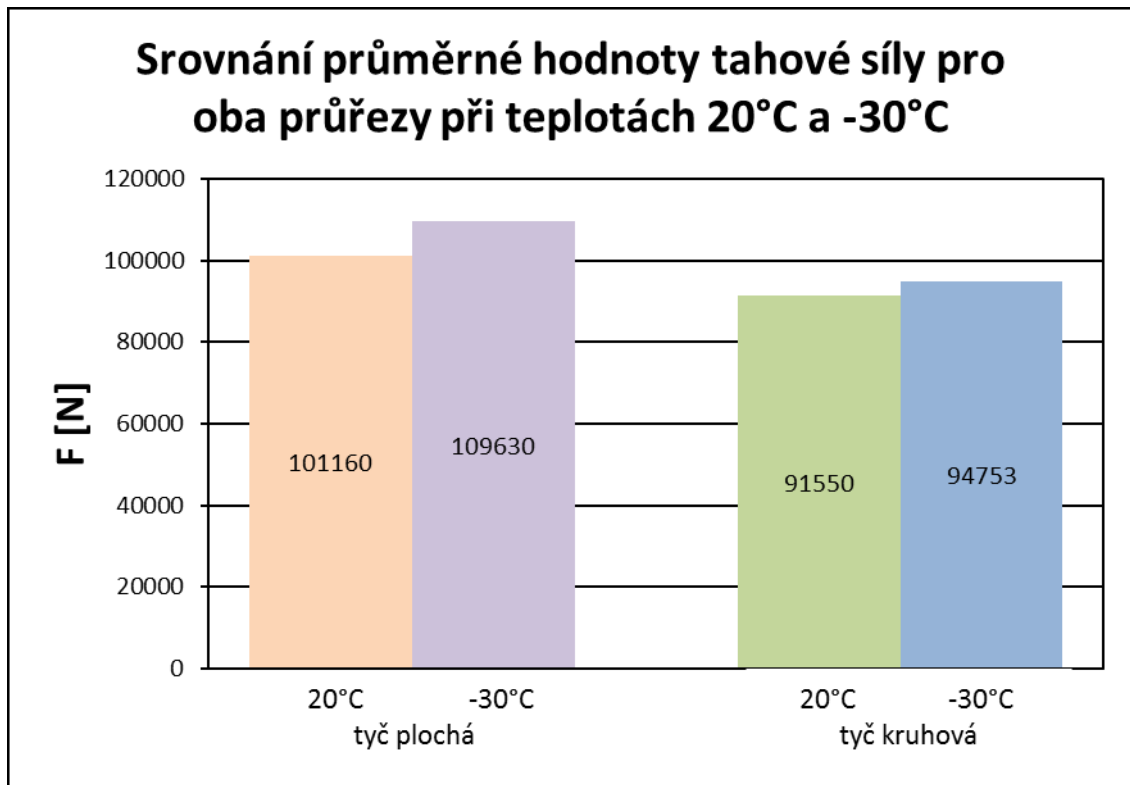
Obrázek 19 - Grafické zobrazení srovnání průměrné hodnoty modulu pružnosti v tahu u obou měřených těles

V grafu č. 19 můžeme vidět srovnání průměrných hodnot modulu pružnosti v tahu E pro těleso s obdélníkovým průřezem a s kruhovým průřezem. Pro těleso s kruhovým průřezem vidíme téměř dvojnásobnou hodnotu.



Obrázek 20 - Grafické zobrazení srovnání průměrné hodnoty meze pevnosti u obou měřených těles

V grafu č. 20 vidíme srovnání průměrných hodnot meze pevnosti R_m pro obdélníkový a kruhový průřez. Zde můžeme vidět velice podobné hodnoty pro těleso s kruhovým průřezem a lehce rozdílné hodnoty pro těleso s obdélníkovým průřezem.



Obrázek 21 - Grafické zobrazení srovnání průměrné hodnoty maximální tahové síly u obou měřených těles

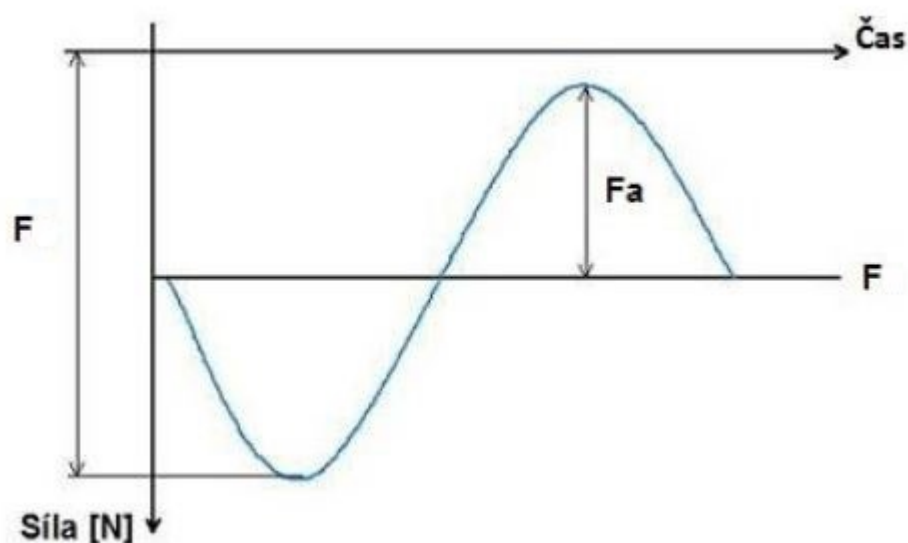
V grafu č. 21 je k vidění srovnání průměrných hodnot maximální tahové síly F , pro těleso s obdélníkovým a kruhovým průřezem. Jak zde můžeme vidět, v tomto zobrazení je maximální tahová síla větší u tělesa s obdélníkovým průřezem. Z této síly určujeme zatížení pro následné cyklické zkoušky. Hodnoty pro zatížení cyklické zkoušky byly zvoleny z maximální tahové síly u těles, která byla měřena při teplotě 20°C, a to vzhledem k nepatrným rozdílům u výsledných hodnot.

9.3 Cyklická únavová zkouška

Zkouška byla provedena pro střídavý tah a tlak. Pro jednotlivé průřezy těles byla zvolena optimální frekvence, vzdálenost mezi čelistmi a vhodná hodnota zatížení. Jako u statické zkoušky tahem byla tělesa měřena při teplotě v dílně, tedy při cca 20°C a při -30°C, tedy ihned po vyndání tělesa z mrazáku. Výsledkem zkoušky je hodnota počtu cyklů, při které došlo k porušení zkoušeného tělesa.

9.3.1 Parametry a uspořádání cyklické zkoušky

Testovací software pro cyklickou zkoušku byl testXpert R. Před zkouškou samotnou byla určena velikost zatížení z průměrné hodnoty maximální tahové síly a provedeno testovací měření, ze kterého se určila frekvence pro jednotlivé průřezy. Zatěžovací křivka měla sinusový průběh. Tělesa byla testována v rozmezí zatížení od 40% do 80% podle průřezu. Pro plochou tyč byla frekvence 98 Hz, pro kruhovou tyč 87 Hz. Minimální hodnota amplitudy zatížení byla vždy 200 N, maximální hodnota F_a byla rozdílná a rovnala se procentuálnímu zatížení.



Obrázek 22 - Sinusový průběh zatížení

9.3.2 Cyklická únavová zkouška pro těleso s obdélníkovým průřezem při teplotě 20°C a -30°C

Těleso bylo upnuto stejně jako při provádění tahové zkoušky, vzdálenost čelistí zůstala také stejná, tedy 970 mm.

Tabulka 12 - Parametry pro cyklickou zkoušku ploché tyče při teplotě 20°C

tyč plochá při 20°C	Velikost zatížení [%]				
	40	45	50	55	60
frekvence [Hz]	98	98	98	98	98
F [N]	101160	101160	101160	101160	101160
Fa [N]	40464	45522	50580	55638	60696

Tabulka 13 - Parametry pro cyklickou zkoušku ploché tyče při teplotě -30°C

tyč plochá při -30°C	Velikost zatížení [%]		
	50	55	60
frekvence [Hz]	98	98	98
F [N]	101160	101160	101160
Fa [N]	50580	55638	60696

9.3.3 Vyhodnocení naměřených dat

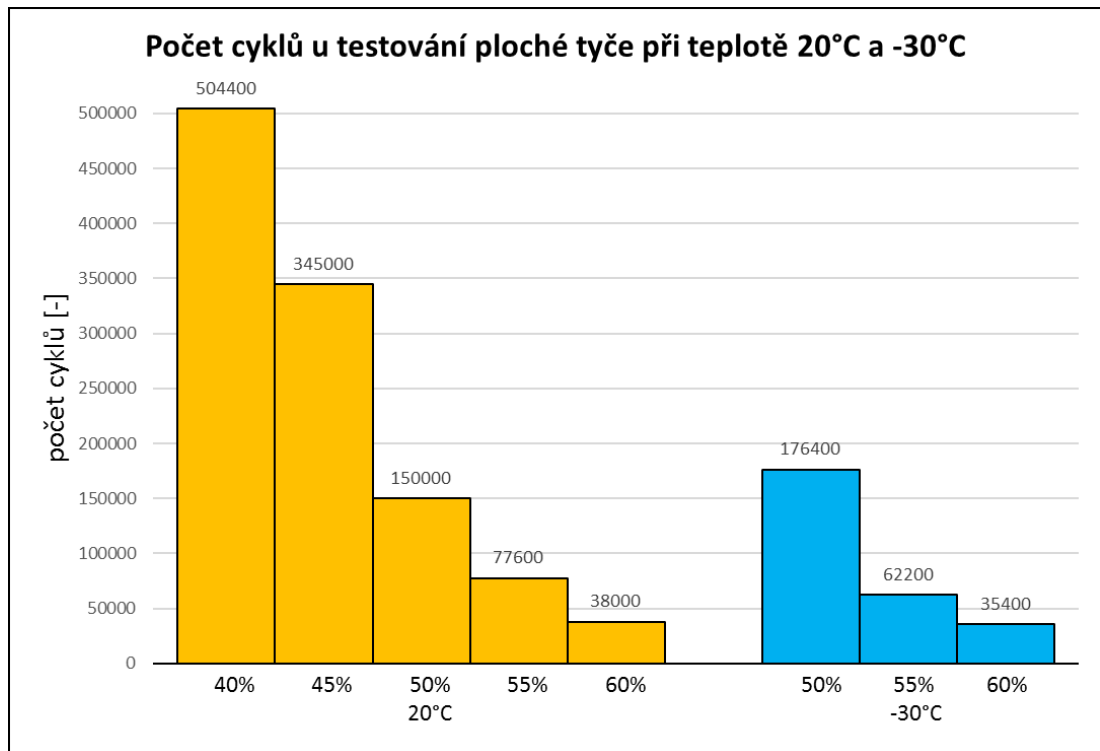
Tělesa byla testována až do úplného porušení nebo v několika případech do vypnutí stroje následkem překročení velikosti proudu. Tělesa byla i tak porušena a byl zaznamenán počet cyklů. V tabulkách č. 14 a 15 jsou k vidění hodnoty velikosti zatížení a počtů cyklů zaznamenaných při částečném nebo úplném porušení tělesa, které byly následně použity k sestavení Wöhlerovy křivky.

Tabulka 14 - Počet cyklů potřebných pro porušení ploché tyče pro dané zatížení při teplotě 20°C

F = 101160 N	Počet cyklů při procentuálním zatížení [-]				
	40%	45%	50%	55%	60%
tyč plochá při 20°C	504400	345000	150000	77600	38000

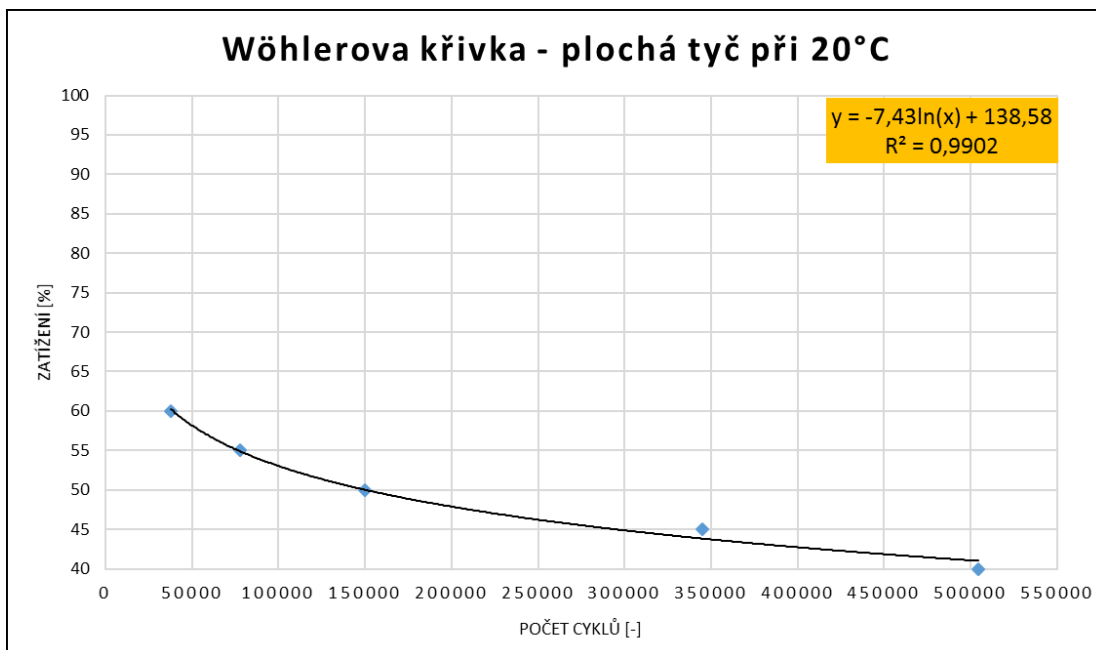
Tabulka 15 - Počet cyklů potřebných pro porušení ploché tyče pro dané zatížení při teplotě -30°C

F = 101160 N	Počet cyklů při procentuálním zatížení [-]		
	50%	55%	60%
tyč plochá při -30°C	176400	62200	35400

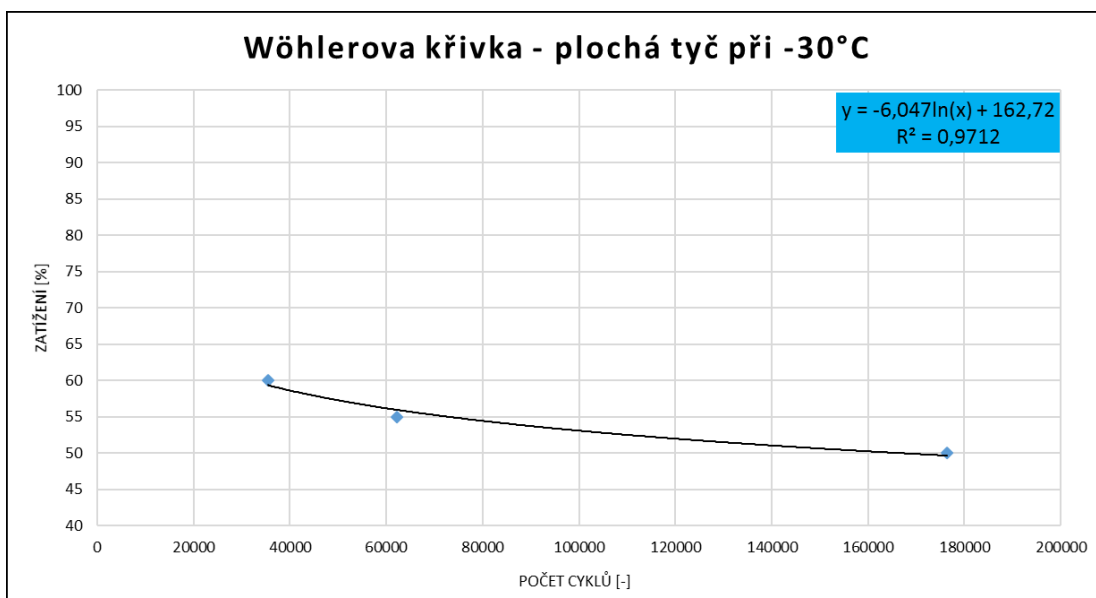


Obrázek 23 - Grafické znázornění srovnání jednotlivých počtů cyklů pro porušení ploché tyče testované při teplotě 20°C a -30°C

Jak můžeme vidět v grafu, pro testování při teplotě -30°C bylo použito méně těles z důvodu malých rozdílů v počtu cyklů nutných k porušení tělesa při stejné hodnotě zatížení. Nebylo tedy nutné dále testovat při nízké teplotě.



Obrázek 25 - Wöhlerova křivka pro tělesa z ploché tyče testované při teplotě 20°C



Obrázek 24 - Wöhlerova křivka pro tělesa z ploché tyče testované při teplotě -30°C

V grafech č. 24 a č. 25 vidíme Wöhlerovy křivky pro zkušební těleso z ploché tyče. Aby byly tyto křivky přesnější, bylo by nutné provést více zkoušek s více tělesy a zatíženími, ale z důvodu nedostatku zkušebních těles to nebylo možné.



Obrázek 26 - Porušená tělesa po provedení cyklické zkoušky

9.3.4 Cyklická únavová zkouška pro těleso s kruhovým průřezem při teplotě 20°C a -30°C

Těleso bylo upnuto stejně jako při provádění tahové zkoušky, vzdálenost čelistí zůstala stejná, tedy 990 mm.

Tabulka 16 - Parametry pro cyklickou zkoušku kruhové tyče při teplotě 20°C

tyč kruhová při 20°C	Velikost zatížení [%]						
	50	55	60	65	70	75	80
frekvence [Hz]	87	87	87	87	87	87	87
F [N]	91550	91550	91550	91550	91550	91550	91550
Fa [N]	45775	50350	54930	59500	64100	68660	73240

Tabulka 17 - Parametry pro cyklickou zkoušku kruhové tyče při teplotě -30°C

tyč kruhová při -30°C	Velikost zatížení [%]	
	75	80
frekvence [Hz]	87	87
F [N]	91550	91550
Fa [N]	68660	73240

9.3.5 Vyhodnocení naměřených dat

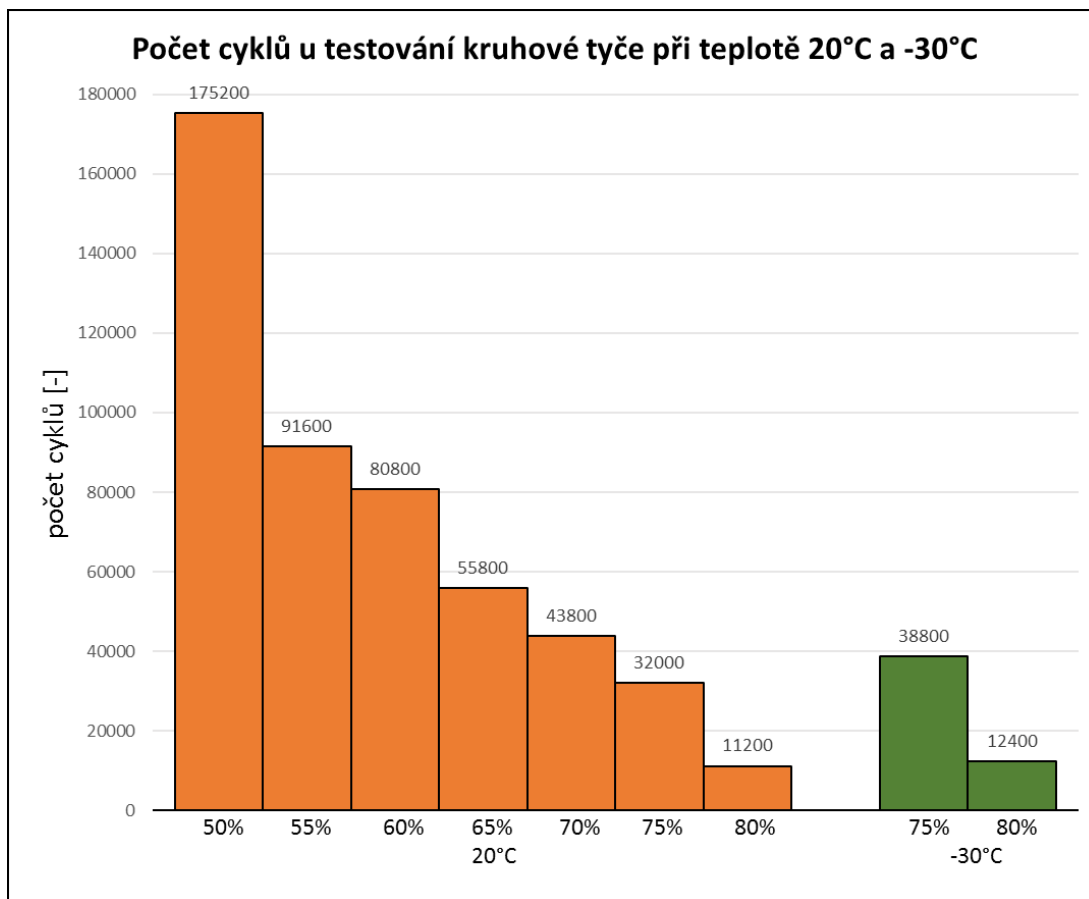
Tělesa byla testována až do úplného porušení nebo v několika případech do vypnutí stroje následkem překročení velikosti proudu. Tělesa byla i tak porušena a byl zaznamenán počet cyklů. V tabulkách č. 18 a 19 jsou k vidění hodnoty velikosti zatížení a počtů cyklů zaznamenaných při částečném nebo úplném porušení tělesa, které byly následně použity k sestrojení Wöhlerovy křivky.

Tabulka 18 - Počet cyklů potřebných pro porušení kruhové tyče pro dané zatížení při teplotě 20°C

F = 91550 N	Počet cyklů při procentuálním zatížení [-]						
	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%
tyč kruhová při 20°C	175200	91600	80800	55800	43800	32000	11200

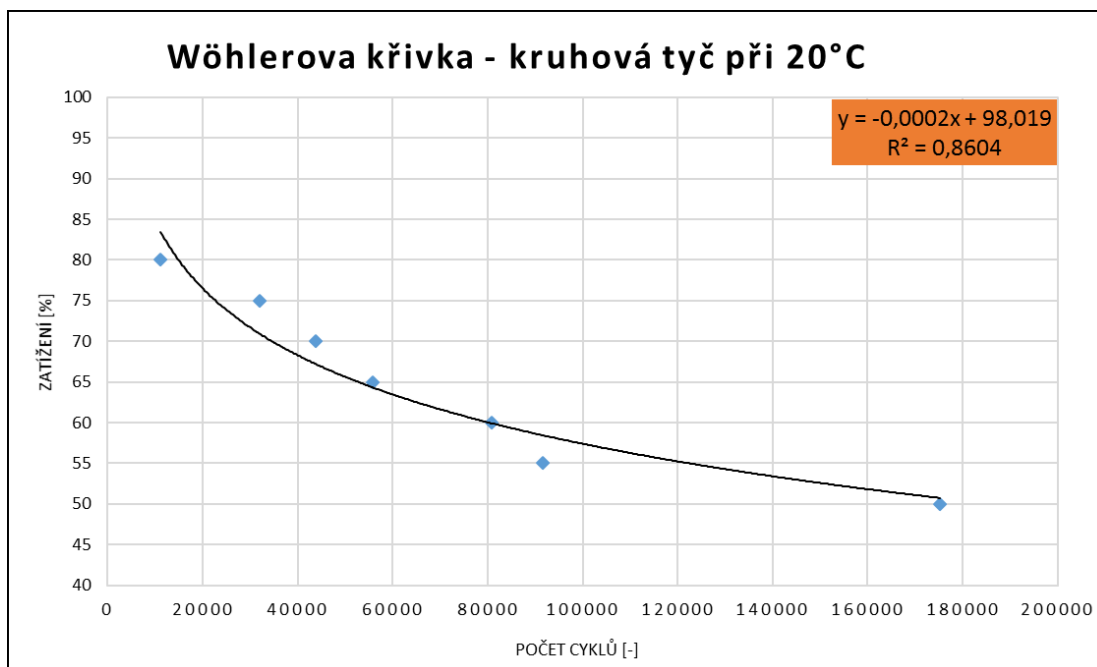
Tabulka 19 - Počet cyklů potřebných pro porušení kruhové tyče pro dané zatížení při teplotě -30°C

F = 91550 N	Počet cyklů při procentuálním zatížení [-]	
	75%	80%
tyč kruhová při -30°C	38800	12400

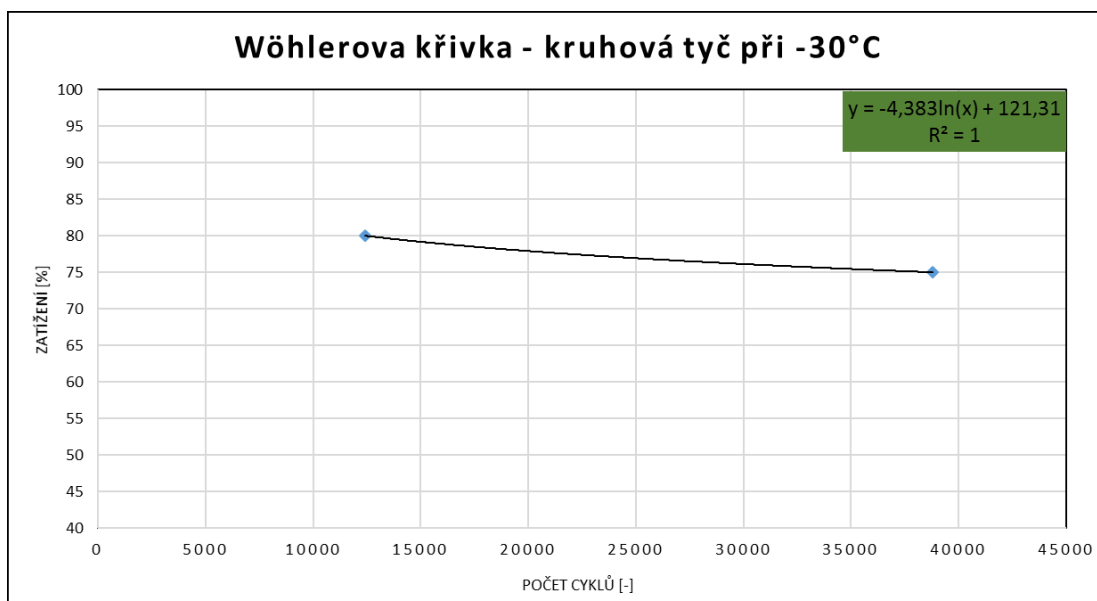


Obrázek 27 - Grafické znázornění srovnání jednotlivých počtů cyklů pro porušení kruhové tyče testované při teplotě 20°C a -30°C

V tomto grafu vidíme, že pro testování těles při teplotě -30°C bylo použito daleko méně těles. Je to opět z důvodu malých rozdílů v počtu cyklů nutných k porušení tělesa při stejných hodnotách zatížení. Další testování při nízké teplotě tedy nebylo nutné.



Obrázek 29 - Wöhlerova křivka pro tělesa z kruhové tyče testované při teplotě 20°C



Obrázek 28 - Wöhlerova křivka pro tělesa z kruhové tyče testované při teplotě -30°C

V grafech č. 28 a č. 29 vidíme Wöhlerovy křivky pro zkušební těleso z ploché tyče. Aby byly tyto křivky přesnější, bylo by nutné provést více zkoušek s více tělesy a zatíženími, ale z důvodu nedostatku zkušebních těles to nebylo možné.



Obrázek 30 - Porušená tělesa po provedení cyklické zkoušky

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo ověřit, zdali po dlouholetém používání zamrazovacích tunelů, především jejich hlavní a pomocné ocelové konstrukce, bude tato konstrukce a její části schopny odolávat teplotnímu a mechanickému zatěžování během běžného provozu, tedy manipulace s paletami, rámy a klecemi pod konstrukcí, údržbě pod i nad ní, odstávek, sanitace, případně zamrazování produktu ve visu určeného k expedici nebo dalšímu uskladnění.

Vzhledem k povaze hlavní ocelové konstrukce, která je tvořena ocelovými profily o minimální velikosti profilu IPE 200, jsem tuto část nepoužil k testování a raději jsem zvolil variantu testování těles z nerezové oceli, ze které je vyrobený spojovací materiál pro hlavní i pomocnou konstrukci.

Pro samotné testování byla vybrána nerezová ocel 17 240. Materiál byl vyroben ve formě tyčí ve variantách kruhového průřezu o průměru 12 mm a plochého obdélníkového průřezu o rozměrech 30 x 5 mm. Následně byl rozřezán na jednotlivá tělesa o délce 150 mm a 120 mm. Část těles byla uložena do mrazáku z důvodu, aby bylo možné dosáhnout co nejbližší teploty, které je v zamrazovacích tunelech. Bylo to z důvodu, že k testovacímu stroji nemohla být připojena klimatická komora.

Jako první byla provedena statická zkouška v tahu. Z této zkoušky byly určeny základní mechanické vlastnosti. Důležitá byla maximální tahová síla potřebná k přetržení zkušební tělesa a její průměrná hodnota, ze které bylo následně určeno zatížení pro další zkoušku. Další zkouškou byla cyklická únavová zkouška, která při určitém zatížení dosáhla počtu kmitů nutných k porušení tělesa.

Výsledky zkoušek ukázaly, že jednotlivé průřezy mají rozdílné hodnoty mechanických vlastností. V modulu pružnosti byl rozdíl takřka dvojnásobný, v mezi kluzu byl rozdíl 38 MPa, v mezi pevnosti 107 MPa a v maximální tahové síle 14 877 N. Rozdíl teplot bez klimatické komory, který byl na začátku každého měření, nevydržel dlouho, vzhledem k zahřívání zkušební tělesa vlivem působení zatěžujících sil. Ovšem tělesa, která měla na začátku měření teplotu -30°C , paradoxně vykazovala po ukončení tahové zkoušky vyšší mez pevnosti a vyšší tažnost. Důvodem je kubická plošně centrovaná krystalická mřížka u austenitické nerezové oceli. U cyklického namáhání nebyly rozdíly veliké, pohybovaly se v řádu několika stovek, někdy několika tisíců, což je u tohoto materiálu zanedbatelné.

Po vyhodnocení výsledků je závěr takový, že testovaná tělesa z materiálu, který je použit pro spojení hlavní i pomocné ocelové konstrukce, vyhovuje daným podmínkám v zamrazovacích tunelech, ať už se jedná o běžný provoz, případné manipulování s produkty ve visu, či při údržbě nebo sanitaci.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] NĚMEC, Milan. Základy strojírenské technologie I. ISBN 978-80-01-06056-8
- [2] Hluchý, Miroslav. Kolouch, Jan. Strojírenská technologie 1. 1. díl, Nauka o materiálu. ISBN: 80-7183-262-6
- [3] Hluchý, Miroslav. Modráček, Oldřich. Paňák, Rudolf. Strojírenská technologie 1. 2. díl, Metalografie a tepelné zpracování. ISBN 80-7183-2365-0
- [4] Hluchý, Miroslav. Kolouch, Jan. Paňák, Rudolf. Strojírenská technologie 2. 1. díl, Polotovary a jejich technologičnost. ISBN 80-7183-244-8
- [5] Hluchý, Miroslav. Haněk, Václav. Strojírenská technologie 2. 2. díl, Koroze, základy obrábění, výrobní postupy. ISBN 80-7183-245-6
- [6] Řasa, Jaroslav. Pokorný, Přemysl. Gabriel, Vladimír. Strojírenská technologie 3. 2. díl, Obráběcí stroje pro automatizovanou výrobu, fyzikální technologie obrábění. ISBN 80-7183-336-3
- [7] Šenberger, Jaroslav. Bůžek, Zdeněk. Záděra, Antonín. Stránský, Karel. Kafka, Václav. Metalurgie oceli na odlitky. ISBN 978-80-214-3632-9
- [8] Grada Publishing, spol. s.r.o., Práce s kovy. ISBN 80-7169-755-9
- [9] Švejda, Karel. a kolektiv. Úvod do strojnictví a elektrotechniky. 04-001-67
- [10] Fischer, Ulrich. a kol. Základy strojnictví. ISBN 80-86706-09-5
- [11] Ptáček, Luděk. a kolektiv. Nauka o materiálu I. ISBN 80-7204-193-2
- [12] Ptáček, Luděk. a kolektiv. Nauka o materiálu II. ISBN 80-7204-130-4
- [13] Leinveber, Jan. Vávra, Pavel. Strojnické tabulky, Třetí doplněné vydání. ISBN 80-7361-033-7
- [14] Leinveber, Jan. Vávra, Pavel. Strojnické tabulky, Šesté vydání. ISBN 978-80-7361-111-8
- [15] Řasa, Jaroslav. Švercl, Josef. Strojnické tabulky pro školu a praxi. ISBN 978-80-86960-20-3
- [16] Stránský, A. Korbař, T. Technický naučný slovník. 04-001-62
- [17] Oceli do nízkých a kryogenních teplot. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/nizke_teploty.pdf

[18] Zkoušky vlastností technických materiálů. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/posit.php?action=0&id=14603&revision=-1&instance=2>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

F_m	Zatěžující síla
L_0	Počáteční délka
d_0	Počáteční průměr
S_0	Počáteční průřez
R_m	Mez pevnosti v tahu
L_u	Absolutní délka
ε	Poměrné prodloužení
ΔL	Poměr změny délky
A	Tažnost
Z	Kontrakce (zúžení)
S_u	Příčný průřez
R	Napětí
R_e	Mez kluzu
R_p	Smluvní mez kluzu
σ	Normálové napětí
τ	Tečné napětí
MPa	Megapascal
mm	milimetr
Hz	Hertz
F_a	Amplituda zatěžování
V	Volt
A	Ampér
E	Modul pružnosti v tahu
W	Práce
S	Plocha

t	teplota
{ny}[%]	Variační koeficient
{no}[%]	Průměrná hodnota
N	Počet cyklů
n	Počet testových těles
s	Směrodatná odchylka

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Únavová křivka napětí	18
Obrázek 2 - Schéma univerzálního zkušebního stroje pro zkoušky tahem, tlakem a ohybem	20
Obrázek 3 - Zkušební tyče pro zkoušku tahem.....	21
Obrázek 4 - Pracovní diagram zkoušky tahem a tlakem u měkké nelegované oceli..	23
Obrázek 5 - Pracovní diagram oceli s výraznou mezí kluzu a oceli bez výrazné meze kluzu	25
Obrázek 6 - Pracovní diagram pro různé pracovní materiály	25
Obrázek 7 - Únavová křivka napětí	27
Obrázek 8 - Wöhlerova křivka.....	27
Obrázek 9 - Zkušební těleso kruhového průřezu	35
Obrázek 10 - Zkušební těleso obdélníkového průřezu	36
Obrázek 11 - Stroj Zwick/Roell Vibrophore 100	37
Obrázek 12 - Zkoušené těleso před a po přetržení.....	38
Obrázek 13 - Pracovní diagram zkoušky tahem závislosti napětí na poměrné deformaci pro těleso o teplotě 20°C	41
Obrázek 14 - Pracovní diagram zkoušky tahem závislosti napětí na poměrné deformaci pro těleso o teplotě -30°C	42
Obrázek 15 - Přetržená tělesa obdélníkového průřezu po tahové zkoušce – vlevo jsou tělesa zkoušená při teplotě 20°C, vpravo při -30°C	43
Obrázek 16 - Zkoušené těleso před a po přetržení.....	44
Obrázek 17 - Pracovní diagram zkoušky tahem závislosti napětí na poměrné deformaci pro těleso o teplotě 20°C	46
Obrázek 18 - Pracovní diagram zkoušky tahem závislosti napětí na poměrné deformaci pro těleso o teplotě -30°C	47
Obrázek 19 - Grafické zobrazení srovnání průměrné hodnoty modulu pružnosti v tahu u obou měřených těles	48
Obrázek 20 - Grafické zobrazení srovnání průměrné hodnoty meze pevnosti u obou měřených těles.....	49
Obrázek 21 - Grafické zobrazení srovnání průměrné hodnoty maximální tahové síly u obou měřených těles	50
Obrázek 22 - Sinusový průběh zatížení	51

Obrázek 23 - Grafické znázornění srovnání jednotlivých počtů cyklů pro porušení ploché tyče testované při teplotě 20°C a -30°C.....	53
Obrázek 24 - Wöhlerova křivka pro tělesa z ploché tyče testované při teplotě - 30°C.....	54
Obrázek 25 - Wöhlerova křivka pro tělesa z ploché tyče testované při teplotě 20°C	54
Obrázek 26 - Porušená tělesa po provedení cyklické zkoušky	55
Obrázek 27 - Grafické znázornění srovnání jednotlivých počtů cyklů pro porušení kruhové tyče testované při teplotě 20°C a -30°C	57
Obrázek 28 - Wöhlerova křivka pro tělesa z kruhové tyče testované při teplotě - 30°C.....	58
Obrázek 29 - Wöhlerova křivka pro tělesa z kruhové tyče testované při teplotě 20°C.....	58
Obrázek 30 - Porušená tělesa po provedení cyklické zkoušky	59

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 - Rozměry tělesa kruhového průřezu</i>	<i>35</i>
<i>Tabulka 2 - Rozměry tělesa obdélníkového průřezu</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka 3 - Parametry zkušebního stroje Zwick/Roell Vibrophore 100 []</i>	<i>38</i>
<i>Tabulka 4 - Získané hodnoty po provedení tahové zkoušky.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabulka 5 - Získané hodnoty po provedení tahové zkoušky.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabulka 6 - Průměrné hodnoty po provedení tahové zkoušky u tělesa o teplotě 20°C.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 7 - Průměrné hodnoty po provedení tahové zkoušky u tělesa o teplotě - 30°C.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 8 - Získané hodnoty po provedení tahové zkoušky.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 9 - Získané hodnoty po provedení tahové zkoušky.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 10 - Průměrné hodnoty po provedení tahové zkoušky u tělesa o teplotě 20°C.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 11 - Průměrné hodnoty po provedení tahové zkoušky u tělesa o teplotě – 30°C</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 12 - Parametry pro cyklickou zkoušku ploché tyče při teplotě 20°C.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabulka 13 - Parametry pro cyklickou zkoušku ploché tyče při teplotě -30°C</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 14 - Počet cyklů potřebných pro porušení ploché tyče pro dané zatížení při teplotě 20°C</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 15 - Počet cyklů potřebných pro porušení ploché tyče pro dané zatížení při teplotě -30°C.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 16 - Parametry pro cyklickou zkoušku kruhové tyče při teplotě 20°C</i>	<i>55</i>
<i>Tabulka 17 - Parametry pro cyklickou zkoušku kruhové tyče při teplotě -30°C</i>	<i>55</i>
<i>Tabulka 18 - Počet cyklů potřebných pro porušení kruhové tyče pro dané zatížení při teplotě 20°C</i>	<i>56</i>
<i>Tabulka 19 - Počet cyklů potřebných pro porušení kruhové tyče pro dané zatížení při teplotě -30°C.....</i>	<i>56</i>