

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3911T016 Materiálové inženýrství a strojírenská
metalurgie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Hodnocení degradovaných stavů materiálů pomocí miniaturních vzorků

Autor: **Bc. Josef MACH**

Vedoucí práce: **Prof. Ing. Václav MENTL, CSc.**

Akademický rok 2018/2019

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Josef MACH**

Osobní číslo: **S17N0102P**

Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie**

Název tématu: **Hodnocení degradace materiálů dlouhodobým provozem pomocí miniaturních vzorků.**

Zadávací katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Úvod
2. Mechanické vlastnosti
3. Testování mechanických vlastností
4. Nestandardní testování mechanických vlastností
5. Úvod do experimentální části
6. Zkoušení mechanických vlastností
7. Výsledky zkoušek
8. Závěr

Rozsah grafických prací: fotodokumentace, obrázky

Rozsah kvalifikační práce: 30-40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Pavel Konopík: *Kompatibilita výsledků hodnocení mechanických vlastností konstrukčních materiálů, disertační práce k získání akademického titulu Phd., ZČU 2014*

Adéla Keramidasová: *Aplikace semidestruktivních metod pro hodnocení životnosti v energetice, diplomová práce, ZČU 2008*

Matyáš Novák: *Hodnocení mechanických vlastností konstrukčních materiálů prostřednictvím miniaturních zkušebních těles, diplomová práce, ZČU 2011*

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Václav Mentl, CSc.**

Regionální technologický institut

Konzultant diplomové práce: **Ing. Josef Volák, Ph.D.**

Regionální technologický institut

Datum zadání diplomové práce: **5. října 2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2019**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž
vedoucí katedry

V Plzni dne 30. října 2018

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské/diplomové práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

Poděkování

Tímto chci poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Prof. Ing. Václavu Mentlovi, CSc. za podporu, vedení i za čas, který mně věnoval. Dále děkuji Ing. Josefu Volákovi, Ph.D., za jeho ochotu, cenné rady a připomínky při řešení dané problematiky.

Tato diplomová práce vznikla za podpory projektu RoRTI “Rozvoj technologií obrábění v RTI- CZ.1.05/2.1.00/19.0391“.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Mach	Jméno Josef		
STUDIJNÍ OBOR	3911T016 Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie			
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Prof. Ing. Mentl, CSc.	Jméno Václav		
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KMM			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ		Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Hodnocení degradovaných stavů materiálů pomocí miniaturních vzorků			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2019
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	66	TEXTOVÁ ČÁST	66	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	<p>Diplomová práce bude řešit hodnocení degradace materiálů dlouhodobým provozem v situacích, kdy není s ohledem na možnosti odběru dostatečného množství reprezentativního materiálu možná realizace zkoušek klasických standardizovaných zkušebních těles. Pro tyto účely budou stanoveny korelace mechanických vlastností mezi klasickými a miniaturními zkušebními vzorky na simulovaných degradovaných stavech oceli/ocelí aplikovaných v energetickém strojírenství.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	<p>Miniature/small/micro/nonstandard test specimens/samples; SPT; small punch test; correlation; miniature tensile testing, mechanical properties</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Mach	Name Josef	
FIELD OF STUDY	3911T016 Materials engineering and engineering metallurgy		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Prof. Ing. Mentl, CSc	Name Václav	
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Evaluation of degraded materials states using miniature samples		

FACULTY	FST	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2019
----------------	-----	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	67	TEXT PART	67	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The diploma thesis will solve the problem of degradation of materials long-term operated in situations where it is not possible to look for sufficient representative material. For this purpose, corrective mechanical properties should be determined between classical and miniature test methods on simulated degraded states..
KEY WORDS	Miniature/small/micro/nonstandard test specimens/samples; SPT; small punch test; correlation; miniature tensile testing, mechanical properties

Obsah

1. Úvod	1
2. Zkoušky kovových materiálů	3
2.1 Mechanické zkoušky	4
2.1.1 Zkouška tahem	5
2.1.2 Zkouška rázem v ohybu	7
2.2 Zkoušení miniaturních vzorků	12
2.2.1 Small punch test	13
2.2.2 Micro tensile test (M-TT).....	15
2.2.3 Micro impact test	16
3. Experimentální materiál.....	19
3.1 Ocel ČSN 41 6236.....	19
3.2 Ocel 15CH2NMFA	22
4. Zkušební zařízení.....	25
4.1 Univerzální trhací stroj Zwick Roell Z 250.....	25
4.2 Rázové kladivo Zwick Roell RKP 450	27
4.3 Pulzátor Zwick Roell 50 HFP 5100	27
5. Příprava vzorků	28
5.1 Dlouhé únavové tyče	28
5.2 Rozřez zkušebních tyčí.....	29
5.3 Rozřez CT těles.....	30
5.4 Vzorky pro zkoušky Tahem	31
5.5 Vzorky pro zkoušky SPT	31
5.6 Minitahové vzorky (M-TT)	31
5.7 Vzorky pro zkoušky vrubové houževnatosti	32
6. Interpretace výsledků	33
6.1 Zkoušky tahem.....	33
6.2 Minitahové zkoušky	35
6.3 Zkoušky SPT	39
6.4 Rázové a minirázové zkoušky	42
7. Diskuze výsledků	43

8. Závěr.....	54
9. Seznam použité literatury.....	56
10. Seznam obrázků	61
11. Seznam tabulek	62

Přehled použitých zkratk a symbolů

A	Tažnost	[%]
A_{gt}	Celkové prodloužení na mezi pevnosti	[%]
B	Poč. rozměr ve směru kolmém k zatěžování	[mm]
C	Materiálová konstanta	[-]
D_s	Průměr SPT disku	[mm]
DIC	Digital Image Correlation	[-]
E	Youngův modul pružnosti tahu	[GPa]
E_{STR}	Střední hodnota energie	[J]
E_{MAX}	Max. energie	[J]
E_{MIN}	Min. energie	[J]
E_{SP}	Energie Small Punch	[J]
E_n	Energie normalizovaná	[J]
E_{US}	Energie- horní prahové hodnoty	[J]
E_{LS}	Energie- spodní prahové hodnoty	[J]
F	Síla	[N]
F_i	Síla v i-tém úseku	[N]
F_{max}	Maximální síla	[N]
ΔF	Rozdíl síly	[N]
FATT	Tranzitní teplota	K (°C)]
H_0	Počáteční výška SPT disku	[mm]
H_f	Šířka SPT disku v nejmenším místě	[mm]
K	Nárazová práce	[J]
KC	Vrubová houževnatost	[J·cm ⁻²]
L	Poč. rozměr ve směru zatěžování	[mm]
Δl	Rozdíl délky	[mm]
l_0	Počáteční délka	[mm]
l_1	Konečná délka	[mm]
M-TT	Micro tensile test	[-]
r	Poloměr SPT kuličky	[mm]
R_e	Mez kluzu	[MPa]
R_{eH}	Horní mez kluzu	[MPa]
R_{eL}	Dolní mez kluzu	[MPa]
R_E	Mez pružnosti	[MPa]
R_m	Mez pevnosti	[MPa]

$R_{p0,005}$	Smluvní mez kluzu (při 0,005% plastické deformace)	[MPa]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu (při 0,2% plastické deformace)	[MPa]
$R_{p0,5}$	Smluvní mez kluzu (při 0,5% plastické deformace)	[MPa]
R_u	Mez úměrnosti	[MPa]
S	Plocha průřezu	[mm]
S_0	Počáteční plocha průřezu	[mm ²]
SP/SPT	Small Punch/ Small Punch test	[-]
t	Čas	[s]
T	Teplota	[K (°C)]
T_{SP}	Přechodová teplota Small Punch	[K (°C)]
u	Prodloužení ve směru zatěžování	[mm]
v	Zkrácení v směru kolmém k zatěžování	[mm]
α	Parametr přechodové teploty	[-]
$\beta_{Rp0,2}$	Materiálová konstanta	[-]
β_{Rm}	Materiálová konstanta	[-]
γ	Materiálová konstanta	[-]
γ'	Materiálová konstanta	[-]
ε	deformace	[-]
ε_f	Efektivní lomová deformace	[-]
σ	napětí	[MPa]

1. Úvod

V rámci standardizovaných metod měření mechanických vlastností konstrukčních materiálů existují zkušební postupy, které dávají výsledky (mechanické vlastnosti) nezávislé nebo naopak závislejší na velikosti zkušebních těles.

Na velikosti zkušebních těles dává nezávislé pevnostní hodnoty (meze kluzu, meze pevnosti) zkouška tahem za pokojové, zvýšené nebo snížené teploty, viz ČSN EN ISO 6892-1,2,3, kde se na základě teorie pružnosti a pevnosti předpokládá, že napětí vznikající v tělese/tyči je do meze pevnosti rovnoměrně rozložené v průřezu.

Zcela zásadní vliv na velikost měřených hodnot mechanických vlastností mají zkoušky těles s koncentrátory napětí, jakými jsou např. klasické zkoušky rázem v ohybu a zkoušky lomové houževnatosti. V případě zkoušek rázem v ohybu, viz ČSN EN ISO 148-1, tyčí typu Charpy, nelze navzájem přepočítávat hodnoty vrubové houževnatosti z těles různé velikosti a tloušťky vzhledem k velikosti plastických deformací na čele vrubu.

Ze základní rovnice pro výpočet lomové houževnatosti vyplývá, že hodnoty lomové houževnatosti lze měřit na tělesech různé tloušťky (a velikosti), nicméně experimentální výsledky potvrdily, že existuje závislost hodnot lomové houževnatosti (daného materiálu při dané teplotě a rychlosti deformace) na tloušťce zkušebních těles [1].

V případě zkoušek únavy jsou vlivy velikosti připisovány jednak charakteru namáhání (např. u zkoušek ohybem), jednak velikosti povrchu zkušebních tyčí. (Lom cyklicky zatěžovaných polykrystalických tvárných kovových materiálů je všeobecně spojen s volným povrchem. Povrchová zrna jsou v bezprostředním kontaktu s okolní atmosférou, takže, je-li okolní prostředí jedním z poškozujících faktorů, jsou tato zrna k porušování náchylnější. Jev únavy je vyvolán kumulací plastické deformace. Zrna na povrchu tělesa jsou jediná zrna v polykrystalu, která nejsou zcela obklopena sousedními zrny. Tato zrna se snadněji plasticky deformují než zrna uvnitř polykrystalu.)

Zatímco v běžném spotřebitelském prostředí je snaha výrobců o co nejčastější obnovu jejich výrobků, v jiných odvětvích je snaha využívat zařízení co nejdéle, samozřejmě za podmínky spolehlivosti a bezpečnosti provozu. Jedním z takých odvětví je např. klasická i jaderná energetika, kde se hledají cesty k prodloužení životnosti rozhodujících komponent, jakými jsou rotory, skříně a tlakové nádoby.

Takovéto snahy musí být podloženy průkazným hodnocením momentálního stavu konkrétního zařízení, při kterém hrají zásadní roli mechanické vlastnosti materiálu dané součásti.

V tomto okamžiku však narážíme na několik zásadních problémů, které je nutno nebo bude nutno vyřešit, aby bylo možné co nejvíce zpřesnit odhady nebo výpočty zbytkové životnosti zařízení.

Především u dlouhodobě provozovaných součástí, jakými jsou např. rotory parních turbín velkých výkonů nebo tlakové nádoby jaderných zařízení, nejsou dostatečně přesně známy originální mechanické vlastnosti. Experimentálně bylo opakovaně prokázáno [1, 2], že výkovky rotorů parních turbín vyrobené z ocele jedné značky jsou v podstatě originálními výrobky a jejich mechanické vlastnosti se rotor od rotoru (tavbu od tavby) liší, byť se jednalo o výkovky rozměrově podobné nebo i shodné, vyrobené stejnou technologií. Navíc, mechanické vlastnosti se místo od místa jednoho rotoru často výrazně liší, např. mezi hlavou a patou původního ingotu (což jsou následně čepové partie rotorů s vysokým stupněm

prokování) nebo mezi obvodovými a vnitřními partiemi rotoru, takže v rámci jediného výkovku se může jednat v podstatě o zcela odlišné (originální!) mechanické vlastnosti. I u tak kvalitních ocelí, jakými jsou ocele pro tlakové nádoby jaderných reaktorů, kdy výsledky zkoušek tahem dávaly v podstatě identické hodnoty, byly shledány podstatné rozdíly v hodnotách lomové houževnatosti jednotlivých prstenců, ze kterých je nádoba následně svařena [3].

Při výrobě se mechanické vlastnosti kontrolují v přesně vymezených lokalitách (a porovnávají se s technickými podmínkami. (Další možností je využít materiál z vývrtu rotorů). Tyto přídavky se odstraňují při konečném obrábění, takže v okamžiku, kdy se provozovatel zeptá, jakou zbytkovou životnost má ještě k dispozici, vzniká problém, jak se přesvědčit o momentální úrovni mechanických vlastností daného materiálu.

Konkrétní materiál nemá vlastnosti uvedené např. v materiálovém listu, které jsou navíc uváděny v určitém rozmezí, u velkých výkovků, např. rotorů parních turbín, se liší místo od místa resp. tavbu od tavby.

Navíc, klasické standardizované mechanické vlastnosti jsou stanovovány na tyčích a tělesech poměrně velkých rozměrů a reprezentativní materiál v takovém objemu nelze z funkčního výrobku zpravidla odebrat. Řešením může být odběr malého množství materiálu a výroba a zkoušky miniaturních vzorků.

V důsledku mechanického, tepelného, či jiného namáhání dochází v materiálu ke změnám jeho mechanických vlastností. Sledováním těchto změn můžeme určit, zda je provozovaná součást stále schopna bezpečného provozu. Zjišťování těchto vlastností probíhá destruktivními metodami, z tohoto důvodu je zde požadavek na odebrání určitého objemu materiálu pro výrobu zkušebních těles. Rovněž je zde nutnost zajištění výsledků ze základního materiálu, aby bylo možné zjistit počáteční stav, se kterým budou porovnávány výsledky po určité době provozu zařízení. Pro odebrání potřebného množství materiálu je nutné odstavit provozní zařízení, což může být značně finančně náročné. Proto je zde snaha o nalezení řešení, které by minimalizovalo tyto problémy a dávalo spolehlivé výsledky potřebné pro hodnocení součásti.

Od 90. let minulého století je zde poměrně velký zájem ve zkoušení mechanických vlastností pomocí miniaturních vzorků. Od té doby byla vyvinuta řada metod, které se zabývají vyhodnocováním chování materiálu při použití minimálního objemu materiálu. Z počátku se problematikou zabýval především jaderný průmysl, kde zmenšení vzorků má velkou řadu výhod, nicméně toto řešení se postupně rozšiřuje i do dalších oblastí, [1, 2].

Tato diplomová práce se zabývá hodnocením degradovaných stavů konstrukčních materiálů. V práci jsou zmíněny základní pojmy, které je nutné znát pro pochopení chování materiálu. Dále jsou zde popsány principy a postupy mechanických zkoušek jak na standardních vzorcích, kde při dodržení podmínek udávající norma je umožněno porovnávání výsledků mezi různými typy materiálů, tak na miniaturních zkušebních tělesech, kde pro správné vyjádření výsledků musí být stanoveny korelace. Z dlouhodobého hlediska by bylo vhodné vytvořit databázi těchto korelací pro zobecnění platnosti výsledků získaných na miniaturních vzorcích.

2. Zkoušky kovových materiálů

Mechanické vlastnosti materiálů jsou jednou ze základních informací o chování materiálu při určitém zatěžování vnějšími silami v různých podmínkách. Kvantitativně se tak dají zjistit hodnoty, které jsou charakteristické pro každý materiál a umožňují tak efektivní využití těchto vlastností. Tyto hodnoty jsou použity při výpočtech a dimenzování strojních součástí a konstrukcí. Zároveň zjištění těchto informací umožňuje porovnávání různých materiálů, což může být technologicky a ekonomicky výhodné. Pro získání požadovaných mechanických vlastností je potřeba výběru právě vhodného materiálu, protože jinak jich dosáhnout. Některé charakteristické vlastnosti, jako je např. mez pevnosti nebo mez kluzu, se dají vyjádřit pomocí jednoduchých vztahů, jejichž definice je přesně dána, ale některé charakteristiky jsou závislé na více faktorech (tvar, rozměry apod.) a získané výsledky se mohou vztahovat pouze na objekt, jenž byl předmětem testování, [4,5].

Mezi základní mechanické vlastnosti materiálů patří:

Pevnost- Rozlišujeme ji podle způsobu namáhání a může být tahová, tlaková, ohybová, smyková a stříhová. Pevnost je definována jako napětí, které je zapotřebí vyvinout na rozlomení materiálu na dvě části.

Houževnatost- Je definována jako velikost práce potřebná k rozlomení materiálu na dvě části. Opakem houževnatosti je křehkost, kde je k rozdělení materiálu potřebná jen malá energie. Kovy a jejich slitiny jsou převážně houževnaté a jejich lom je doprovázenou plastickou deformací. Práce potřebná k rozlomení je tedy rovna práci potřebné k přetvoření.

Pružnost- Je vlastnost materiálu vracet se do svého původního stavu po předchozí deformaci, která byla vyvolána působením napětí.

Tvrdoost- Je odpor materiálu proti místnímu vnikání cizího tělesa. Tato vlastnost však není fyzikálně definovatelná, neboť je velmi závislá na jiných vlastnostech materiálu (elasticita, křehkost, plasticita, stav povrchu, atd.).

Deformační a lomové chování materiálů je velmi obsáhlé a komplexní téma. Toto chování je popsáno pomocí základních vztahů, které jednoznačně určují stav daného materiálu při působení vnějších sil za daných podmínek. Zde si uvedeme některé z těchto vztahů.

Napětí- Je vyvoláno v materiálu působením vnějších sil. Jeho velikost závisí na velikosti zatěžující vnější síly a na velikosti nosného průřezu, který je ve směru kolmém ke směru hlavního napětí. Napětí se dá rozdělit na normálové a tečné, nejčastěji se uvádí v N/mm^2 a dá se vyjádřit následujícím vztahem:

$$\sigma = \frac{F}{S} \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] \quad (1)$$

kde σ - napětí [MPa]

F- Velikost vnější síly [N]

S- velikost plochy, která je kolmá k ose směru hlavního napětí [mm^2]

Deformace- je jev, při kterém působící napětí, které bylo vyvoláno vnějšími silami, způsobuje změny rozměrů. Deformaci můžeme rozdělit na tahovou a smykovou, [3-6].

Poměrná tahová deformace:

$$\varepsilon = \frac{u}{L} [-] \quad (2)$$

kde u - prodloužení tělesa ve směru zatěžování [mm]

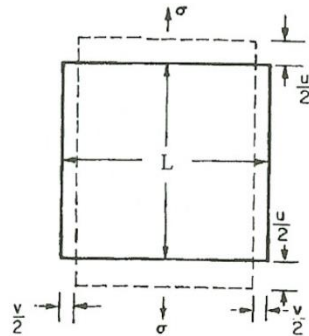
L- počáteční rozměr tělesa ve směru zatěžování [mm]

Poměrné zúžení:

$$\psi = \frac{v}{B} [-] \quad (3)$$

kde v- zkrácení tělesa ve směru kolmém na směr zatěžování [mm]

B- počáteční rozměr tělesa ve směru zatěžování [mm]



Obrázek 1 Schéma deformace vzorku jednoosým tahem [5]

Zkoušky můžeme rozdělit na destruktivní a nedestruktivní. Nedestruktivními zkoušky jsou stejně důležité jako destruktivní, nicméně v této diplomové práci se jimi vzhledem k tématu nebudeme zabývat.

2.1 Mechanické zkoušky

Při mechanických zkouškách dochází k deformaci zkoušeného tělesa. Při těchto zkouškách jsou pozorovány napěťové a deformační charakteristiky, které vyjadřují chování materiálu při zatížení vnějšími silami. Získávají se tím informace, které jsou potřebné při návrhu jakékoli strojní součásti. Zkoušky se dají použít rovněž při kontrole aktuálního stavu, popř. zbytkové životnosti, provozních zařízení. Aby byla zajištěna porovnatelnost výsledků zkoušek zjištěných za různých okolností, byly stanoveny určité podmínky. Tyto podmínky, které musí být dodržovány při provádění jednotlivých zkoušek, uvádějí příslušné normy. Mezi základní zkoušky patří zkoušky tahem, zkoušky rázem v ohybu, zkoušení únavy materiálů, zkoušky tvrdosti, aj. V této diplomové práci se budeme zabývat pouze dvěma z těchto zkoušek a to zkouškou tahem a rázem v ohybu.

2.1.1 Zkouška tahem

Zkouška tahem patří mezi nejdůležitější zkoušky materiálů, ze které jsme schopni zjistit základní vlastnosti daného materiálu. Zkoušky mohou být provedeny za použití vzorků nebo přímým zkoušením dané součásti, kde jde především o zkoumání chování zkoušené součásti za daného zatížení. Tyto zkoušky udávají přímou závislost deformace součásti v závislosti na velikosti a směru napětí. V některých případech ovšem může výsledky ovlivňovat způsob upnutí (bezpečné uchycení zkoušeného tělesa způsobuje zároveň jeho deformaci). Při zkouškách tahem dochází nejčastěji ke zkoušení vzorků jednoduchého průřezu, které jsou odebrány z místa vybraného pro testování. Podmínky zkoušení, tvar zkušebních vzorků a jiné parametry zkoušky tahem kovových materiálů za pokojové teploty (24 ± 5 °C) definuje evropská norma ČSN EN ISO 6892-1, [7].

Rovněž existují normy definující zkoušky tahem za snížených a zvýšených teplot:

Nižší teploty- ČSN EN ISO 6892-2 [8]

Vyšší teploty- ČSN EN ISO 6892-3 [9]

Zkouška tahem probíhá pomalým zatěžováním vzorku určitou silou F , která je vyvinuta pomocí zkušebního zařízení, působí ve středu vzorku a způsobuje tak jednoosé namáhání. Tato síla vyvolá v tělese napětí a deformaci. Napětí je sledováno pomocí siloměrné buňky ve stroji a deformace pomocí snímačů deformace (optické či mechanické průtahoměry, dráha příčnicku, apod.). Pro velikost smluvního napětí platí vztah:

$$R = \frac{F}{S_0} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (4)$$

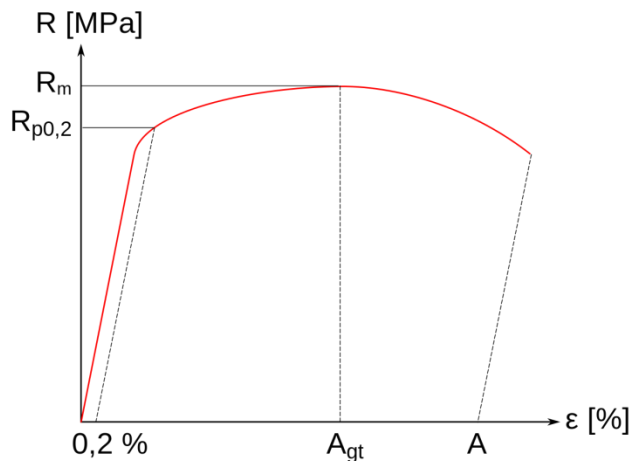
Tomuto napětí vždy odpovídá deformace, kde se počáteční měřená délka l_0 prodlužuje na konečnou délku l_1 . Jak plyne z předchozího vztahu, tato závislost je stažena pouze k počátečnímu průřezu a nebere v potaz změnu velikosti počátečního průřezu S_0 na konečný průřez S_1 .

$$\text{Celkové prosté prodloužení- } \Delta l = l_1 - l_0 \text{ [mm]} \quad (5)$$

$$\text{Poměrné prodloužení- } \varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} [-], \quad (6)$$

$$\text{popř. vyjádřené v procentech } \varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100 \text{ [%]}$$

Závislost smluvního napětí na poměrném prodloužení zobrazuje smluvní diagram R - ε (obr. 2). Pracovní diagram nám potom udává závislost F - Δl .



Obrázek 2 Smluvní diagram R-ε [10]

Jak je vidět na obr. 2, počáteční závislost je přímkového charakteru. Děje se tak proto, že materiál je zatěžován silou, která způsobuje pouze elastickou deformaci tělesa. V této oblasti platí Hookeův zákon:

$$R = E \cdot \varepsilon \text{ [MPa]} \quad (7)$$

,kde E je modul pružnosti v tahu a odpovídá směrnici přímkové oblasti diagramu. Tuto směrnici lze v praxi vyhodnocovat mnoha způsoby. Dnes již samozřejmě existují lepší způsoby vyhodnocení, než ruční metoda, kde se vyhodnocení provádí na papíře a může být více či méně subjektivní. Snímaná data vyhodnocuje software, kde je možnost zvolení oblasti pro vyhodnocení E modulu. Zároveň lze body záznamu prokládat různými metoda (sečna, regrese, apod.). Konec platnosti Hookeova zákona je nastává při dosažení meze úměrnosti, označované jako R_u . Zde se přímková začíná ohýbat a odchylovat od přímkové části, což je způsobeno větší rychlostí deformace. Nedochází zde však k trvalé deformaci zkoušeného tělesa až do hodnoty napětí meze pružnosti R_E . U polykrystalických materiálů je mez pružnosti v podstatě identická jako mez úměrnosti. Aby bylo možno stanovit okamžik, kdy dochází k první plastické deformaci, byla zavedena tzv. smluvní mez pružnosti. Tato mez odpovídá hodnotě napětí, jež protíná rovnoběžka se směrnici přímkové části při 0,005% plastické deformace. Zjišťování této hodnoty ovšem může být poměrně náročné a jsou kladeny relativně přísně nároky na záznamové zařízení a plastická deformace je velmi malá. Proto se v technické praxi považuje pružné chování materiálu až do meze kluzu označovanou R_e . Mez kluzu je velmi důležitou veličinou, která se používá při dimenzování strojních součástí. Závisí na strukturních a substrukturních faktorech a její hodnota závisí na teplotě a rychlosti deformace. Je to v podstatě prahová hodnota, po jejímž překročení dochází k výrazné plastické deformaci. U některých materiálů (např. vyžíhané nízkouhlíkové oceli) dochází ke stavu, kde při nárůstu deformace nedochází k nárůstu síly. Zde se jedná o výraznou mez kluzu, kde lze jednoznačně identifikovat horní prahovou hodnotu označovanou jako horní mez kluzu R_{eH} . Při překonání této hodnoty dochází k poklesu síly a následné narůstající deformaci bez zvětšující se síly. Tento stav je ukončen další prahovou hodnotou s názvem dolní mez kluzu R_{eL} . Oblast mezi R_{eH} a R_{eL} se označuje jako oblast Lüdersovy deformace. Za hodnotou R_{eL} je opět pro zvětšení deformace potřebné zvýšení zatěžující síly. Z praktického hlediska je významná především horní mez kluzu. Pro materiály, u nichž k tomuto stavu nedochází, byla stanovena (podobně jako v případě meze pružnosti) smluvní

mez kluzu, označena $R_{p0,2}$. Je to hodnota, odpovídající napětí potřebnému k vytvoření 0,2 % plastické deformace. Dle vztahu (456) odpovídá velikost deformace $\varepsilon_p=0,002$. Hodnota trvalé plastické deformace, při které je vyhodnocována smluvní mez kluzu se v jednotlivých normách liší. Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ je doporučena v ISO, DIN i ASTM normě. V některých případech se používá $R_{p0,1}$. Britské standardy potom uvádějí i $R_{p0,5}$. Při měření smluvní meze je opět použito snímačů prodloužení, které musí mít požadovanou citlivost (konkrétní hodnoty uvádí příslušná norma). Při měření $R_{p0,2}$ může být zvětšení průtahoměru až o řád horší než při určování modulu pružnosti. U některých materiálů je obtížné zachytit přímkovou část záznamu napětí- poměrná deformace a proto je určení modulu pružnosti a smluvní meze kluzu obtížné. V těchto případech se smluvní mez kluzu odečítá z celkové deformace ε_t . Celková deformace je složena z obou složek deformace- elastické ε_e a plastické ε_p . Většinou se volí hodnota $\varepsilon_t= 0,005$ a označuje se jako $\varepsilon_{t0,5}$. Typickým příkladem je např. vyžíhaná čistá měď, či šedá litina. Při dalším zvětšování síly se dostaneme na hodnotu meze pevnosti, označované jako R_m . Jedná se o napětí, které bylo dosažené při maximální síle působící na „nezdeformovaný“ průřez. Výraz nezdeformovaný zde není tak úplně přesný, protože k malé změně průřezu dojít musí, vzhledem k zákonu zachování objemu. Tato změna průřezu je velmi malá a při malých deformacích nevede k nijak výraznému ovlivnění výsledků. Proto je tato změna průřezu zanedbána. Pro R_m platí:

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (8)$$

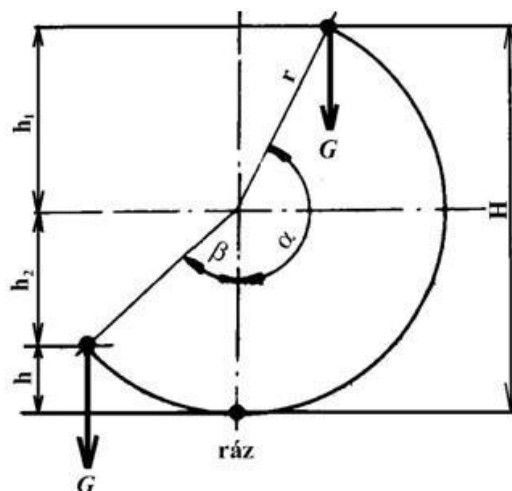
Do této meze dochází k rovnoměrné deformaci vzorku v celém objemu zkoušené části. Překonáním této hodnoty dochází k nerovnoměrné deformaci zkoušeného objemu. Zde je důležité si uvědomit, že různé průřezy zkoušeného objemu se mohou lišit. V každém z nich bude různý počet poruch, vměstků a jiných heterogenit, které mohou při působícím zatížení zapříčinit koncentraci napětí v daném místě. Zpravidla se to projevuje vznikem krčku, který se vytvoří v místě s největším napětím. Tvoření krčku sebou doprovází změnu nosného průřezu. Zde již změna průřezu není zanedbatelná a na smluvním diagramu se to projevuje jako pokles napětí při zvětšující se deformaci. Při vyčerpání veškeré plasticity materiálu dochází k lomu zkoušeného vzorku, [3-6].

2.1.2 Zkouška rázem v ohybu

Zkoušky rázem v ohybu se řadí mezi zkoušky dynamické. Cílem této zkoušky je určení houževnatosti materiálu. Zkouška je destruktivní a vzorek je při zkoušce přeražen na dvě části. Faktory, ovlivňující získané výsledky, jsou především teplota, rychlost deformace a stav napjatosti.

Principem zkoušky je přeražení zkušební vzorku určitých rozměrů a geometrie. Schéma zkoušky rázem v ohybu je vidět na obr. 2. Hlavními částmi zkušebního zařízení je rám stroje, kyvadlové kladivo a podpory, které slouží k usazení vzorku. Při zkoušce se kladivo vypustí ze své původní polohy, které následně narazí do vzorku. Tato zkouška se provádí dle ČSN EN ISO 148-1- Kovové materiály- Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy [11]. Ukázka pracovního uspořádání při zkoušce je vidět na obr. 3. Nárazem dochází k deformaci vzorku, což se projeví ztrátou určité energie. Tato energie je rovna práci potřebné k přeražení zkušební tělesa a může být vyjádřena jako:

$$K = G(H - h) = G(h_1 + h_2) = G[r \cdot \cos(180 - \alpha) + r \cdot \cos\beta] \quad (9)$$
$$= G \cdot r(\cos\beta - \cos\alpha)$$

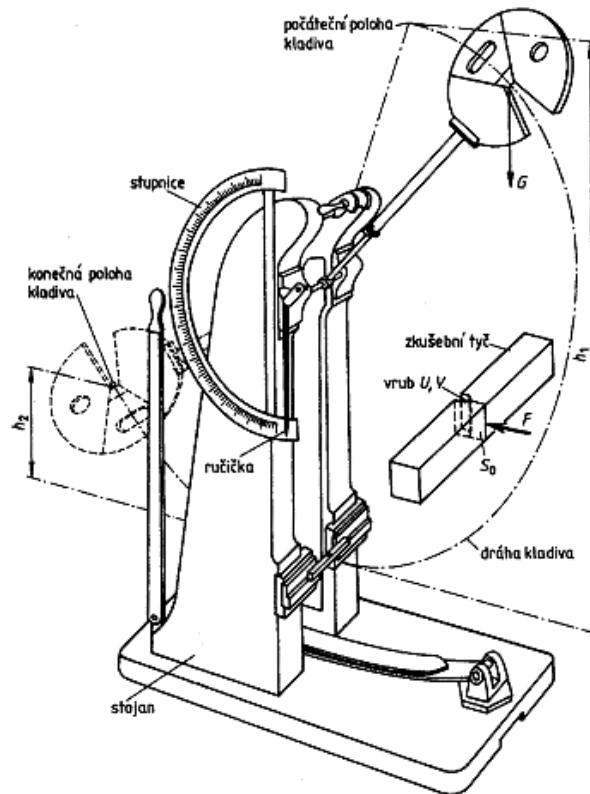


Obrázek 3 Schéma zkoušky rázem v ohybu [54]

Jak již bylo zmíněno výše, cílem zkoušky je zjištění houževnatosti materiálu. To se provádí pomocí určování velikosti práce potřebné k rozlomení zkušebního tělesa. Protože velikost potřebné práce závisí na mnoha faktorech, byl zaveden pojem vrubová houževnatost, kterou zavedl francouzský fyzik G. Charpy. Vrubová houževnatost je vyjádřena jako:

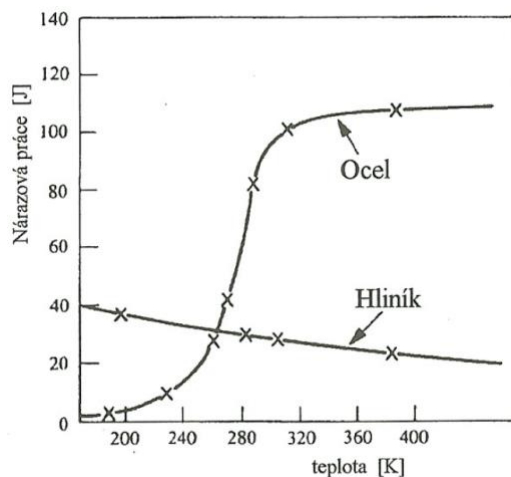
$$KC = \frac{K}{S_0} [J \cdot cm^{-2}] \quad (10)$$

Jak plyne ze vztahu (2), vrubová houževnatost je práce potřebná na přeražení zkušebního tělesa vztahovaná na určitou plochu průřezu pod vrubem. Nicméně každý typ vrubu, působící jako koncentrátor napětí, má vzhledem ke své geometrii jiné napětíové pole v okolí kořene vrubu, kde se iniciuje trhlinka. Vliv mají rovněž rozměry zkoušeného tělesa. Ty silně ovlivňují distribuci napětí v průřezu vzorku. Z toho důvodu je vrubová houževnatost pouze relativní veličinou, která se nedá použít při výpočetních operacích při návrhu součástí. Získané hodnoty jsou porovnatelné pouze za dodržení podmínek, které jsou pro všechny zkoušené vzorky stejné. Mezi tyto podmínky patří dodržení rozměrů vzorku i vrubu v předepsaných tolerancích, teplota při zkoušce, energie kladiva, a mnoho dalších.



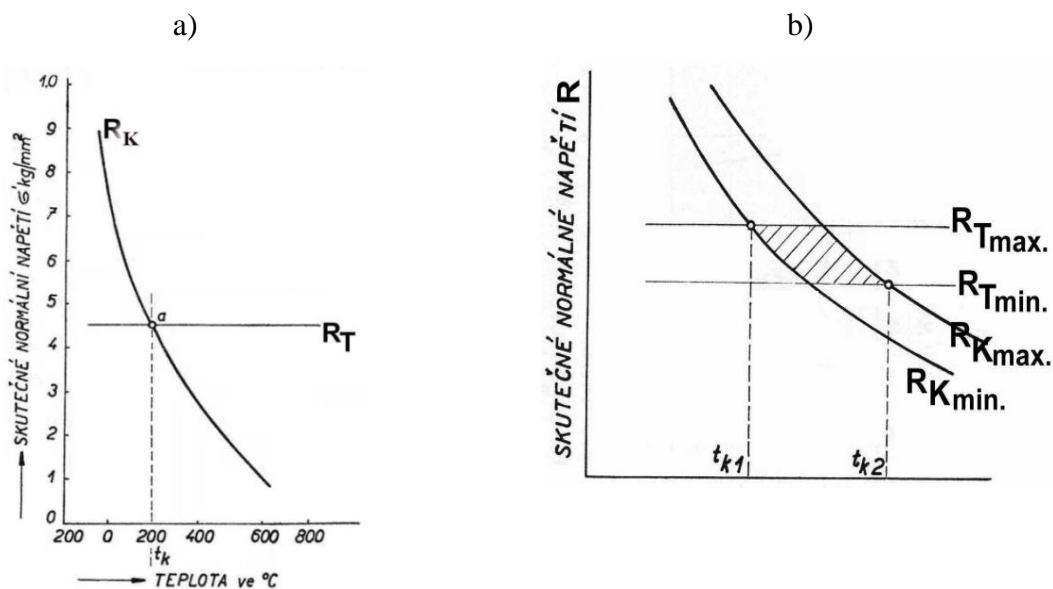
Obrázek 4 Pracovní uspořádání zkoušky rázem v ohybu [55]

Teplota je dalším důležitým aspektem při zkouškách rázem v ohybu. U ocelí můžeme zjednodušeně říci, že se snižující se teplotou klesá hodnota vrubové houževnatosti. Naopak při vzrůstajících teplotách roste zároveň houževnatost materiálu a tím se hodnoty vrubové houževnatosti zvyšují. Většina běžně využívaných ocelí vykazuje přechodové chování. To nemusí platit pro všechny materiály. Příkladem jsou austenitické oceli nebo hliníkové slitiny, které nevykazují žádný nebo pouze pozvolný přechod ke křehkému lomu a teploty přechodu mohou být tak nízko, že je v reálném prostředí téměř nelze dosáhnout. Zanesením hodnot vrubové houževnatosti v závislosti na teplotě do diagramu dostáváme tzv. křivku teplotní závislosti vrubové houževnatosti (Vidalova křivka), viz. obr. 4. Studium lomů jednotlivých vzorků je možné určit, zdali se jedná o lom křehký, houževnatý či smíšený. Na základě tohoto pozorování je poté možné určit přechodovou teplotu.










Obrázek 5 Vidalova křivka [5]

Přechodová teplota je teplota, při níž dochází k přechodu z houževnatého lomu na křehký. Způsoby vyhodnocování uvádějí opět příslušné normy. Vyhodnocení přechodových teplot může být provedeno různými způsoby. Jedním ze způsobů je stanovení přechodové teploty tam, kde je podíl křehkého a houževnatého lomu 1:1, tzn. 50 % křehkého a 50 % houževnatého lomu. Dalším kritériem může být například stanovení minimální hodnoty KC . Teorii vzniku přechodové teploty uvedl Ludwik a Joffe. Tato teorie je založena na faktu, že mez pevnosti není rapidně ovlivněna rychlostí deformace a teplotou. Nicméně to neplatí pro mez kluzu, která změnou jednou z těchto parametrů může nabýt velmi rozdílných hodnot. Závislost nám zobrazuje Joffeho diagram (obr. 5).



Obrázek 6 a) Joffeho diagram, b) Joffeho diagram pro polykrystalické materiály [56]

Výroba zkušebních těles je relativně jednoduchá (v porovnání například se vzorky na zjišťování zbytkové životnosti) nicméně i zde jsou dovolené odchylky, které je nutno dodržet pro zaručení korektních výsledků. Vzorky mohou mít různé tvary i rozměry. Zároveň jsou definované i různé tvary vrubů [3-6]. Vliv tvaru vrubů na vrubovou houževnatost měkké uhlíkové oceli je vidět na obr. 6.

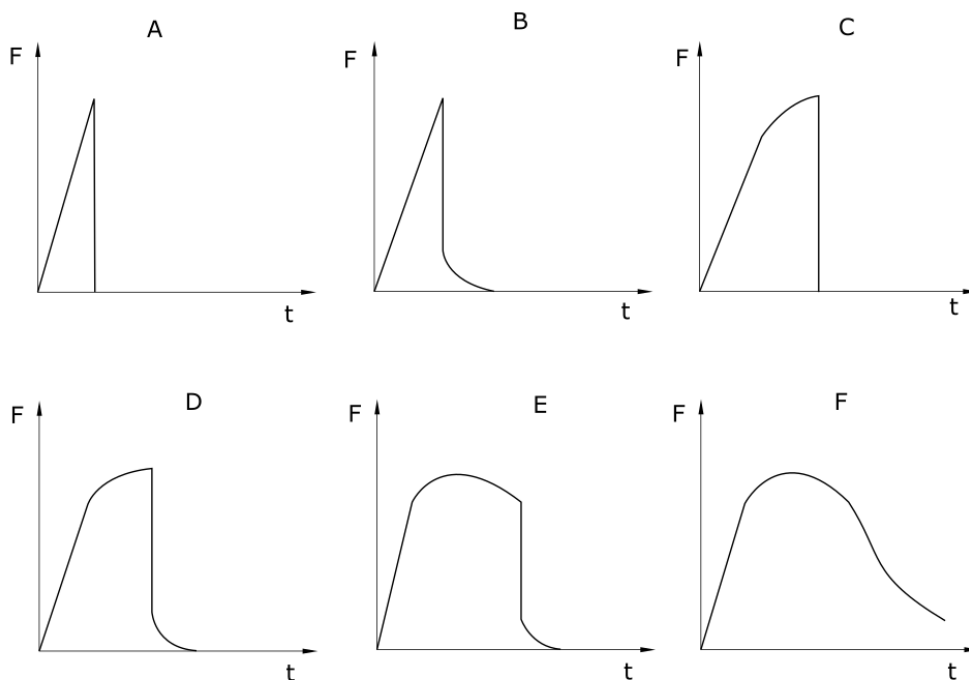
Vzorek	Úhel vrubu	Vrbová houževnatost [J.cm ⁻²]
		61
	30°	67
	60°	64
	90°	71
	120°	115
	150°	183
	180°	174

Obrázek 7 Vliv tvaru vrubu na vrubovou houževnatost [5]

Výrazný posun ve zkoušení rázem v ohybu byl docílen sledováním síly v průběhu přerážení zkušební tyče. To bylo dosaženo instrumentací zkušebního břítu. Toto zkoušení se řídí normou ČSN EN ISO 14556 [12]. Měření síly je docíleno tenzometrickým snímačem, umístěným přímo v břítu rázového kladiva. Rovněž je zde možnost využití snímače využívající piezoelektrického jevu. Tyto snímače ovšem nejsou tak rozšířené jako tenzometrické. Jedno z možných využití instrumentovaných zkoušek je stanovení podílu křehkého a houževnatého lomu. Průběh síly při deformaci vzorku se nejčastěji uvádí v závislosti na dráze kladiva (průhybu vzorku). Ze záznamu je pak možné určit typ křivky. Zde každý typ křivky odpovídá různým oblastem přechodového diagramu. Na obr. 7 jsou vidět jednotlivé typy křivek.

Typy křivky lze rozdělit do následujících kategorií, [12]:

- A a B- průběh odpovídající spodním prahovým hodnotám
- C, D, E- průběh odpovídající smíšeným lomům (přechodová oblast)
- F- průběh odpovídající horním prahovým hodnotám



Obrázek 8 Schématické znázornění typů křivek [12]

Instrumentované zkoušky se používají pro zjištění dalších mechanických vlastností při dynamickém zatížení, jako je například dynamická mez kluzu či pevnosti. Tento vztah představil Server v roce 1978, kde ze změřené síly lze celkem dobře vypočítat dynamickou mez kluzu. Hodnocení dynamické mezi pevnosti pomocí tohoto vztahu se jeví jako nevhodné, protože je zde jiný poměr mezi tahovým a smykovým napětím. Nicméně experimenty ukázaly, že vhodnými korelacemi získaných výsledků je možné vyhodnocovat dynamickou mez pevnosti. [13-15]

2.2 Zkoušení miniaturních vzorků

Testováním miniaturních zkušebních vzorků dochází k jejich trvalému poškození, čímž se řadí mezi destruktivní. Nicméně těleso, ze kterého je odebírán materiál, neztrácí svou funkčnost a odběrová místa je možné dodatečně opravit např. vyvařením nebo se nemusí opravovat vůbec, pokud zásah nezpůsobuje takové poškození součásti, že by byla ohrožena funkčnost a spolehlivost součásti. To jsou důvody, proč se zkoušení miniaturních vzorků označuje jako semi-destruktivní metoda. Tyto metody jsou výhodné jak ekonomicky, tak technologicky a největší využití nalézají při kontrole či odhadu zbytkové životnosti dlouhodobě provozovaných součástí. Zde se nabízí především energetický průmysl, který podléhá náročným kontrolám a testování je možné provádět bez odstávky zařízení, což je ekonomicky velmi náročné. Zároveň lze odhadnout zbytkovou životnost zařízení a tím předejít katastrofě, když se součást blíží na konec své životnosti, nebo naopak prodloužit používání součásti a tím minimalizovat ztráty, [16]. Metody, jimiž se budeme v této diplomové práci zabývat, jsou:

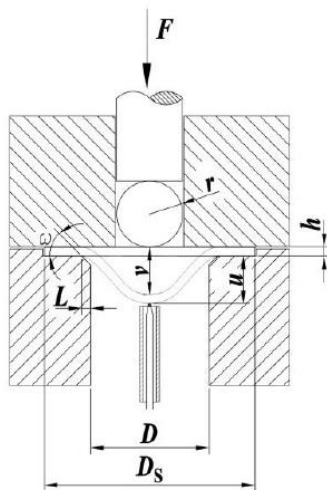
- Small punch test (SPT)
- Micro tensile test (M-TT)
- Micro impact test

2.2.1 Small punch test

Metodě SPT byla věnována velická pozornost již od 80. let minulého století, [17]. Aplikací této metody došlo k redukci radioaktivního záření, kterému byli zaměstnanci vystavováni. Rovněž se snížily náklady na ozařování a množství radioaktivního odpadu. Byla vyvinuta na M.I.T. a rozvíjena byla na začátku převážně v Japonsku a USA [18-22]. V současné době se tato metoda používá v především v jaderné energetice [23-25], nicméně rozšiřuje se i do jiných průmyslových odvětví jako je letecký průmysl [26, 27], automobilový průmysl [28] i zdravotnictví [29]. I přes značný vývoj této metody dosud neexistuje žádná mezinárodní norma, která by stanovila přesné postupy a požadavky při zkoušení, některé země však mají své národní standardy nebo jiné postupy [30-32]. Nejnovějším evropským ustanovením je přednormativní dokument CEN (Workshop Agreement-CWA) 15627. Norma EN s názvem „Metallic materials- Small punch test method“, která je formulována pod záštitou ECISS/TC101/WG11 (Pracovní skupina (WG) 1 technické komise (TC) 101 "Test methods for steel (other than chemical analysis)" v rámci technického výboru Iron and Steel Standards (ECISS)), je připravována. Norma bude popisovat postup SPT pro zjištění tahových a lomový chování vlastností materiálu při nízkých i vysokých teplotách. Zároveň bude popisovat creepové zkoušky při jednoosém zatížení (SPC).

Princip metody

Při SPT i SPC je vzorkem ve tvaru kruhového disku protlačován kulový hrot. Síla působí uprostřed plochy disku. SPT je řízené deformací, což znamená, že indentor je vtlačován do vzorku konstantní rychlostí. Síla je zaznamenávána v závislosti na hloubce průniku v (*dráze trnu*) nebo deformaci vzorku u . Testování SPC je řízeno silou. Zde je naopak konstantní síla a je zde měřena veličina v nebo u v závislosti na čase t .

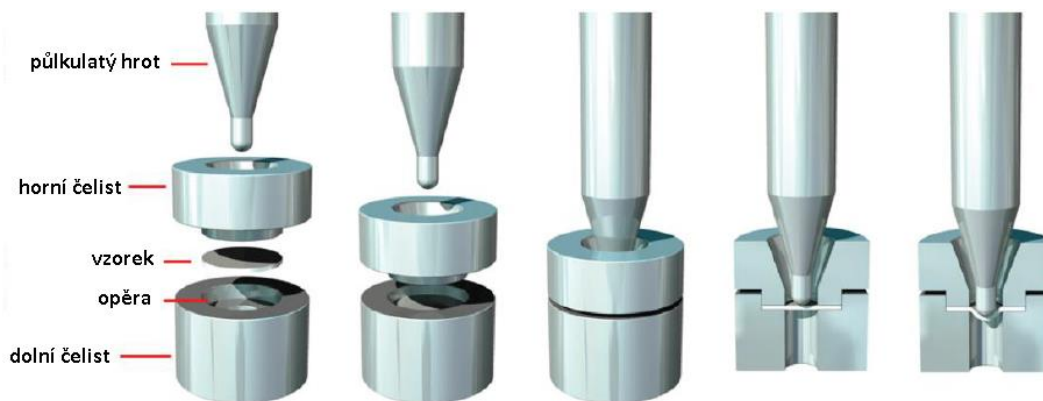


Obrázek 9 Schéma SP testu [39]

Testovaným tělesem je nejčastěji plochý disk o průměru $D_s = 3-8$ mm a šířce $h_0 = 0,25-0,5$ mm. Nejvíce experimentů bylo provedeno spíše pro větší rozměry disků (především $8 \times 0,5$ označován jako standardní).

Vzorek je upnut mezi horní a dolní čelist. Ve spodní čelisti je otvor o průměru D a sražení o velikosti L . Obě tyto hodnoty jsou závislé na typu zkoušeného tělesa. Hodnoty pro

$D_s = 8 \text{ mm}$ a $D_s = 3 \text{ mm}$ jsou uvedeny v tab. 1. Horní čelistí prohází protlačovací hrot, který vzorek začne prohýbat. Přitom dochází ke vtažení vzorku do otvoru v dolní čelisti, což vyvolává tření mezi opěrnou čelistí a vzorkem. Z toho plyne, že získané výsledky budou, m.j., záležet i na kvalitě povrchu vzorku.



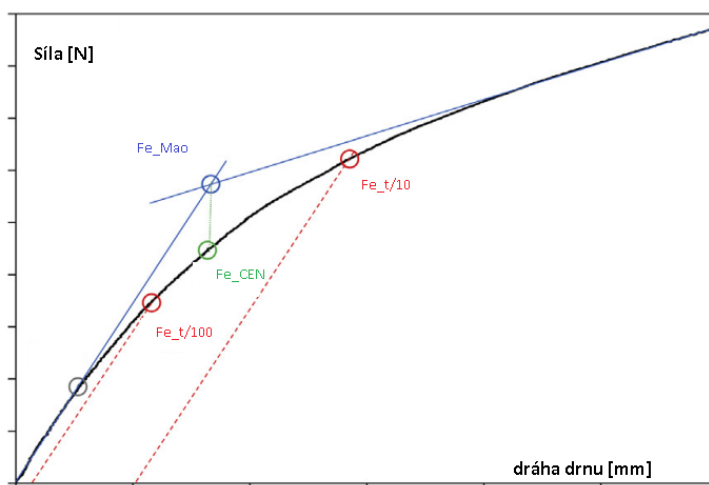
Obrázek 10 Průběh SP testu [33]

Vyhodnocování materiálových vlastností

Zatímco podmínky a princip zkoušení zůstaly více méně stejné jako v CWA 15627, doporučení v informativních přílohách týkající se vyhodnocování výsledků se podstatně změnila a rozšířila. Pro mez kluzu platí následující vztah [21,34,35]:

$$R_{p0,2} = \beta_{Rp0,2} \cdot \frac{F_e}{h_0^2} \quad (11)$$

kde $\beta_{Rp0,2}$ je materiálová konstanta závislá na geometrii vzorku (např.: Pro vzorek z oceli s $R_{p0,2}$ od 200 do 1000 MPa o průměru 8 mm a snímaním dráhy trnu je $\beta_{Rp0,2} = 0,479$). Síla F_e je dle definice Maoa a Takahashiho [6] bod (viz. obr. 3), kde se protínají dvě tangenty – jedna z elastické oblasti a druhá z plastické oblasti (F_{e_Mao}). Toto pojetí je využíváno nejčastěji. CEN definici upravil a určil, že je to místo kde je spuštěna vertikální přímka z bodu, kde se protínají dvě tangenty, a protíná křivku záznamu (F_{e_CEN}). Jiní autoři uvádějí, že je to například hodnota, kde rovnoběžka s tangentou elastické oblasti posunutá o $t/10$ ($F_{e_t/10}$) nebo $t/100$ ($F_{e_t/100}$) protne křivku záznamu [19,20].



Obrázek 11 Vyhodnocení F_e pro výpočet $R_{p0,2}$ [22]

Pro hodnocení meze pevnosti používá mnoho autorů korelaci mezi R_m a F_m velmi podobný vztah jako pro $R_{p0,2}$ [36,37]:

$$R_m = \beta_{Rm} \cdot \frac{F_m}{h_0 u_m} \quad (12)$$

kde F_m je maximální síla dosažená při zkoušce a β_{Rm} je geometricky závislý korelační koeficient, který se určuje experimentálně. Rovněž existuje vztah, který vypočítává mez pevnosti přímo ze síly F_i působící při zkoušce deformaci u_i nebo při dráze trnu v_i . Hodnota u_i je nezávislá na tahových vlastnostech materiálu, ale je spojena s nástupem plastické nestability. Příklad hodnot u_i/v_i a β_{Rm} je uveden v tab. 1. Vztah pro výpočet R_m je [37-39] :

$$R_m = \beta_{Rm} \cdot \frac{F_i}{h_0^2} \quad (13)$$

Tabulka 1 Ukázka výsledků konstanty pro zjištění R_m [26]

D_s [mm]	D [mm]	r [mm]	sražení	h_0 [mm]	Typ křivky	u_i/v_i [mm]	β_{Rm}
8	4	1,25	0,2x45°	0,5	F(u)	0,552 (u_i)	0,192
8	4	1,25	0,2x45°	0,5	F(v)	0,645 (v_i)	0,179
3	1,75	0,5	0,2x45°	0,25	F(u)	0,282 (u_i)	0,205
3	1,75	0,5	0,2x45°	0,25	F(v)	0,320 (v_i)	0,197

Pro hodnocení prodloužení A uvádí literatura dva vztahy. Fluery a Ha [40] udávají vztah (4), kde γ je empirická konstanta rovna 7. Rodríguez a spol. [34] navrhli verzi, kde je deformace vydělena tloušťkou vzorku, který byl 0,5 mm a vyšla hodnota $\gamma'=14$. To dává přesnou shodu při dosazení do vztahu (5):

$$A(\%) = \gamma \cdot u_m \quad (14)$$

$$A(\%) = \gamma' \cdot \frac{u_m}{h_0} \quad (15)$$

2.2.2 Micro tensile test (M-TT)

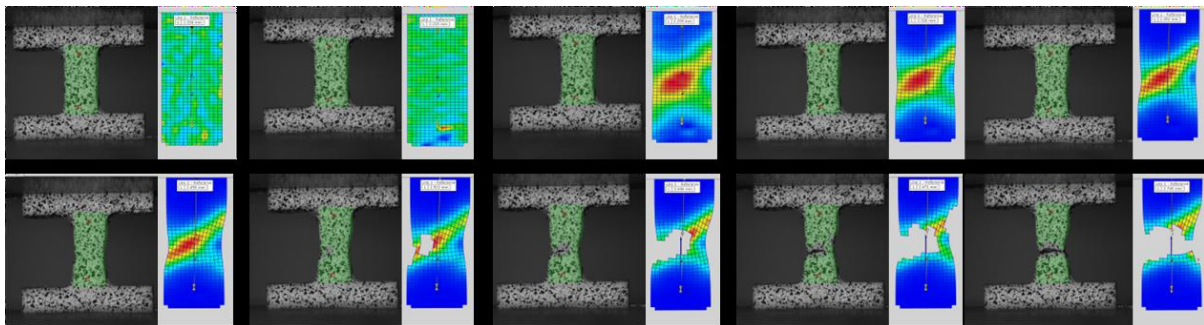
Tato metoda se principem zkoušení v podstatě neliší od standardní zkoušky tahem [27]. Vzhledem k miniaturním rozměrům zkušebních vzorků se zde určují různé vztahy a korelace, pomocí nichž je možno získávat reprezentativní výsledky. Nicméně existují omezení, které se při běžné zkoušce tahem neprojevují nebo nemají žádný vliv na výsledky. Těchto faktorů je mnoho (kvalita povrchu, rozměry a tvar vzorku, počet zrn v průřezu, atd.), proto je zde snaha o nalezení vhodné metodiky zkoušení, která by vedla k obecně platným výsledkům. Zároveň by bylo možné vytvořit databázi zjištěných korelací a tím tak dále prohlubovat využitelnost této metody. Touto problematikou se již zabývá mnoho autorů [16,41,42], kteří využívají různá řešení pracovního uspořádání. V současné době se již provádí i tzv. nano-tensile testy, které se používají pro hodnocení mechanických vlastností na úrovni jednotlivých zrn [43,44].

Opět se zde měří síla potřebná k přelomení zkušební tyče pomocí snímače síly. Rozdílné je snímání prodloužení vzorku, kde vzhledem k malým rozměrům nelze použít mechanické extenzometry. Využívá se proto optický systém, které jsou schopny bezkontaktně měřit prodloužení vzorku. Příklady aplikací jsou např. zkoušky za vysokých a kryogenních teplot. V zásadě existují 3 typy bezdotykových průtahoměrů:

- Videoextenzometr, kde je pomocí kamer sledována určitá oblast na povrchu vzorku. V této oblasti jsou určena dvě místa, která jsou pomocí kamer sledována. Vzdálenost těchto míst je prakticky neomezena, protože kamery dokážou měřit jak velmi malou vzdálenost počátečních bodů, tak i zároveň několik metrů vzdálených. Zde je zapotřebí použití více kamer, což s sebou nese i náležitě komplikace při korelaci obrazu, stanovení přesných relativních poloh kamer, apod. U tohoto typu snímání je nutné, aby byl na povrchu vzorku určitý reliéf. Po nastavení sledovaných oblastí si kamera tento reliéf „hlídá“.

- Laser, který je schopný měřit prodloužení v rozsahu 1% až 1000%. To opět umožňuje velký rozsah měření, který je využitelný i pro M-TT testy. Systém je výhodný především u zkoušek za zvýšených a snížených teplot.

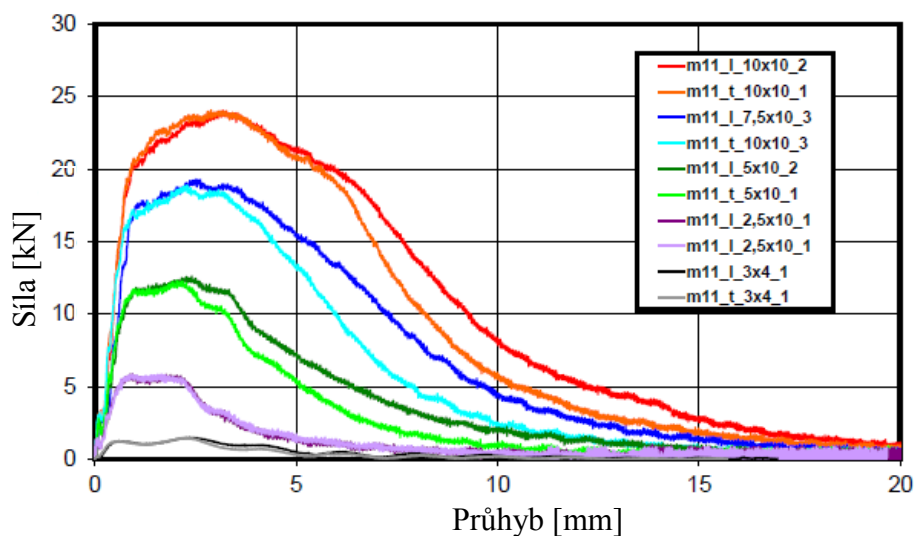
- Digital Image Correlation (DIC) tato bezkontaktní metoda sestavuje sub-pixelové zobrazení 3D povrchu pozorovaného vzorku. Tento systém je schopen vyhodnocovat prodloužení a deformace pomocí snímků s velkým rozlišením, která mezi sebou porovnává a vyhodnocuje změny. Výhody tohoto systému spočívají ve schopnosti určení přesné 3D polohy, posuvu a napětí pro jemné 3D zasíťování, vyhodnocení rovinného tenzoru deformace a sledování tvaru předmětu. Příklad systému používající DIC je zařízení Aramis od společnosti GOM (obr. 4). [16]



Obrázek 12 Ukázka z měření pomocí kamery GOM Aramis 3D [16]

2.2.3 Micro impact test

Vedle běžně používaných zkušebních vzorků, které mají rozměry 10x10x55 mm, jsou v normě [11] definovány i jiné rozměry zkušebních tyčí, kde šířka zůstává zachována a mění se pouze tloušťka vzorku. Tloušťky udávající norma při šířce 10 mm jsou 7,5, 5 a 2,5 mm. Nejmenší uvedený vzorek je mini-Charpy o rozměrech 3x4x27 mm. Na obr. 1 je vidět rozdíl potřebné síly k přeražení zkušebního vzorku. Jak již bylo zmíněno v kap. 2.2.2. (zkouška rázem v ohybu), výsledky získané na tělesech rozdílných rozměrů nejsou porovnatelné [5].



Obrázek 13 Instrumentovaný záznam pro různé typy těles [16]

Experimenty ukázaly [29,45-50], že rozdíly jsou znatelné a pouhé porovnání hodnot vrubové houževnatosti nestačí. Dají se ovšem najít korelační vztahy, které udávají vztah mezi výsledky získaných na různých rozměrech zkoušených vzorků. Tyto vztahy jsou platné pouze pro daný materiál a pro stejné podmínky zkoušení. To platí i při zjišťování přechodové teploty.

Další možností zjištění přechodové teploty je pomocí již zmíněného SP testu. Pro zjištění přechodové teploty metodou SPT (DBTT) je důležité znát hodnoty FATT zkoušeného materiálu. Zkoušení musí proběhnout za teplot, kde je lomová energie největší a nejmenší. Jako spodní prahová hodnota se zde bere 200mJ. Naměřená data FATT i SPT jsou proložena regresní křivkou v oblasti, kde dochází k poklesu potřebné energie pro přeražení se snižující se teplotou. Z hodnot energií, získaných pomocí standardních zkoušek, se vypočte střední hodnota (6). Vypočtená hodnota energie je odvedena rovnoběžkou s osou x, kde protne křivku SPT. Místu kde je křivka protnuta odpovídá určitá teplota. Tato teplota je T_{SP} . Z této hodnoty poté můžeme určit parametr, který slouží k přepočtu FATT na T_{SP} (2) [30-32, 51, 52].

$$E_{STR} = \frac{E_{MAX} + E_{MIN}}{2} \quad (16)$$

$$\alpha = \frac{T_{SP}}{FATT}, \quad (17)$$

kde E_{MAX} a E_{MIN} je maximální a minimální lomová energie, E_{STR} je střední hodnota lomové energie, α je experimentálně stanovený parametr a T_{SP} je tranzitní teplota SP. Pro určení TSP musí být small punch energie závislá na teplotě. E_{SP} je vyjádřena jako[32]:

$$E_{SP} = \int_0^{u_m} F(u)du \quad (18)$$

Pokud jsou v materiálu přítomné nějaké nedokonalosti, může se na záznamu objevit skok (pop-in). Tento efekt je způsoben kvazistatickým porušováním vzorku. Pokud jsou tyto

„skoky“ přítomny na záznamu, provádí se integrace pouze do místa před tímto skokem. Velikost tohoto skoku závisí na velikosti trhliny, nicméně za významné se považují ty, kde skokový rozdíl síly je větší než 10 % maximální síly. Velikost skoku se může volit různá s ohledem na zkoušený materiál[32].

$$\Delta F = 0,1 \cdot F_m \quad (19)$$

Před určením T_{SP} z $E_{SP}(T)$ je dobré si vyjádřit vztah mezi ESP a F_m . To vede ke konstantním hodnotám v horních oblastech energií[32].

$$E_n = \frac{E_{SP}}{F_m} \quad (20)$$

Poté lze metodou nejmenších čtverců určit T_{SP} pomocí následující rovnice:

$$E_n(T) = \frac{E_{US} + E_{LS}}{2} + \frac{E_{US} - E_{LS}}{2} \tanh \left[\frac{T - T_{SP}}{C} \right], \quad (21)$$

kde E_{US} , E_{LS} , C a T_{SP} jsou parametry. E_{US} a E_{LS} jsou energie z horních a dolních hodnot (normalizovány F_m (5)) [32,51,53].

Alternativní hodnocení přechodové teploty je vyhodnocování pomocí deformace. Efektivní lomová deformace je definována jako:

$$\varepsilon_f = \ln \left[\frac{h_0}{h_f} \right] \quad (22)$$

, kde h_0 je počáteční tloušťka vzorku a h_f je nejmenší tloušťka vzorku v místě lomu. Tato hodnota může být měřena destruktivně, rozřezem vzorku a následným měřením, optickou mikroskopií nebo RTG tomografií. Pokud je ε_f určeno pro větší množství teplot, může být $T_{SP,\varepsilon}$ zjištěno stejně jako v rovnici (11) dosazením do vztahu [32]:

$$\varepsilon_f(T) = \frac{\varepsilon_{US} + \varepsilon_{LS}}{2} + \frac{\varepsilon_{US} - \varepsilon_{LS}}{2} \tanh \left[\frac{T - T_{SP,\varepsilon}}{C} \right] \quad (23)$$

3. Experimentální materiál

K hodnocení mechanických vlastností různých stavů materiálu byly zvoleny dva materiály. V obou případech se jedná o nízkolegovanou CrNiMoV ocel. První z nich je ocel s označením dle ruských GOST norem 15CH2NMFA. Tato ocel byla používána pro výrobu tlakových nádob reaktorů VVER 1000 v JE Temelín. Tato ocel byla cyklicky zatěžována při různých napěťových hladinách. Po tomto stádiu byly z materiálu vyrobeny jak klasické, tak miniaturní zkušební vzorky. Druhým materiálem byla ocel s označením ŠN 16 236 (ČSN 41 6236). Z této oceli se vyráběly vysokotlaké rotory parních turbín. Tento materiál byl vystaven vysokým teplotám s cílem napodobení stavu materiálu, který vzniká po dlouhodobém provozu vysokotlakých rotorů.

3.1 Ocel ČSN 41 6236

Jedná se o nízkolegovanou CrMoNiV ocel s ekvivalentním označením 28CrMoNiV4-9. Tato ocel se používá pro vysokotlaké (VT) rotory parních turbín v podniku ŠKODA Plzeň. Vzorky této oceli pocházejí z těles C/150 a C/200, která byla použita pro zkoušky lomové houževnatosti provedené v letech 1983/4 v tehdejší Ústředním výzkumném a zkušebním ústavu ŠKODA Plzeň (ÚVZÚ), dnes Výzkumný a zkušební ústav PLZEŇ S.R.O. (VZU), viz [57].

Původní materiál pro výrobu zkušebních těles typu „C“ tloušťky 150, resp. 200 mm pro zkoušky lomové houževnatosti byl získán rozřezem výkovku o průměru 1150 mm a délce 900 mm. Ten byl vyroben obvyklou technologií používanou pro kování a tepelné zpracování výkovků rotorů z 25 t tavby v elektrické peci po vakuování v pánvi. Tato ocel se používala pro vysokotlaké a středotlaké rotory do provozní teploty 525°C.

Chemické složení je uvedeno v tab. 2-4. Mechanické vlastnosti dle materiálového listu jsou v tab. 5. (viz ŠN 41 6236 Ocel 16 236 Cr-Ni-Mo-V/1978).

Tabulka 2 Tabulkové chemické složení ocele 16 236

prvek	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	P	S
Hm. %	0,25- 0,30	0,60- 0,85	Max. 0,40	0,90- 1,20	0,55- 0,8	0,80- 1,00	0,25- 0,35	Max. 0,025	Max. 0,025

Tabulka 3 Chemické složení oceli 15 236 ve výchozím stavu

prvek	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V
Hm. %	0,31± 0,014	0,48±0, 009	0,02±0, 002	0,02±0, 002	0,01±0, 001	1,07±0, 008	0,63±0, 027	0,80±0, 052	0,19±0, 012

Tabulka 4 Chemické složení oceli 15 236 ve stavu 7 (viz níže)

prvek	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V
Hm. %	0,28± 0,013	0,48±0 ,029	0,02±0, 0005	0,02±0 ,003	0,01±0, 0004	1,11±0 ,028	0,63±0 ,024	0,80±0 ,042	0,19±0 ,013

Tabulka 5 Mechanické vlastnosti ocele 16 236

Rm [MPa]	Rp0,2 [MPa]	A [%]	KCV [J·cm ⁻²]	HB
690-890	540	16	40	208-272

Doporučené tepelné zpracování je následující: Žihání 650-730°C + kalení 930-970°C/olej + popouštění 680-730°C/vzduch.

Rozřezem uvedeného výkovku byla získána zkušební tělesa, která byla dále řezána na menší tělesa typu CT tloušťky 25 mm. Ta nebyla použita ke zkouškám a dochovala se v archivu ÚVZÚ (dnes Výzkumný a zkušební ústav Plzeň), odkud byla získána pro účely této práce. Zkušební tělesa tloušťky 150 a 200 mm byla vedena v Mechanické zkušebně ÚVZÚ pod Laboratorními čísly 229 a 238, tělesa CT25 pod čísly 429 a 430. Jedná se tak o původní materiál neovlivněný provozem.

Tato zkušební tělesa (CT25) byla žihána při teplotě 575 a 600 °C tak, aby byla simulována odpovídající doba provozu. Doba žihání byla přepočtena pomocí Larson – Millerova parametru tak, aby odpovídala provozu při teplotě 500 °C po dobu 10000, 100000, 200000 a 300000 hodin. V tabulce 6 je vidět přehled s parametry simulovaných stavů.

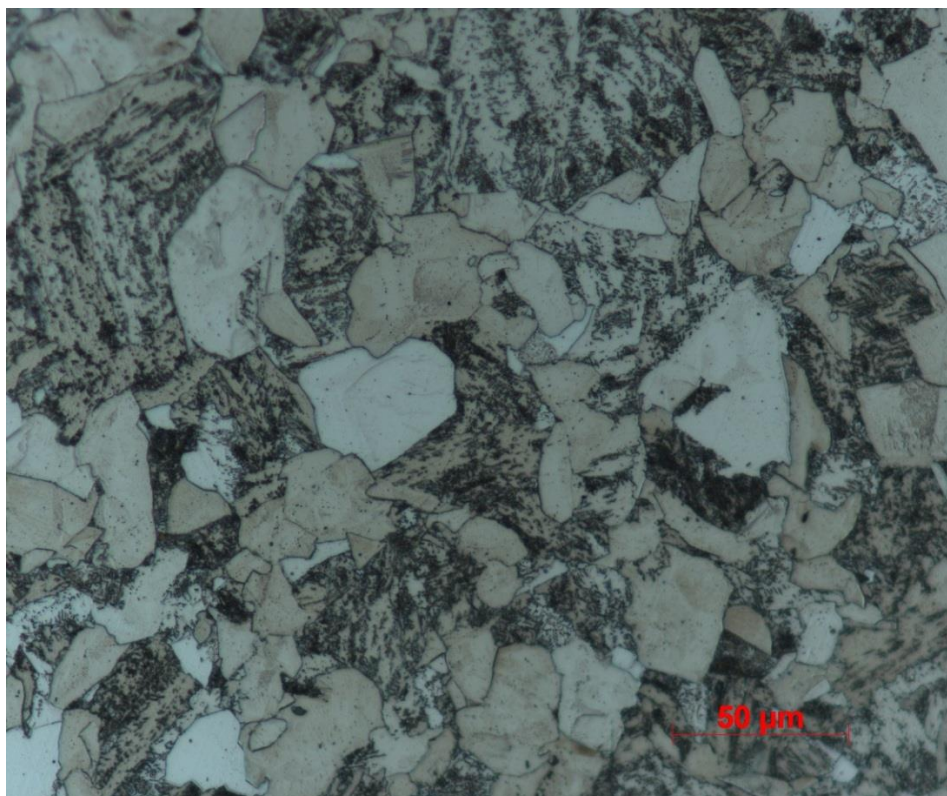
Tabulka 6 Přehled simulovaných stavů

Doba do lomu	Teplota	LMP	Stav	Teplota	Doba žihání	Stav	Teplota	Doba žihání
10000	500	18552	0	575	75,4	4	600	17,8
100000	500	19325	1	575	615,1	5	600	136,9
200000	500	19557	2	575	1156	6	600	252,8
300000	500	19693	3	575	1674,3	7	600	362,1

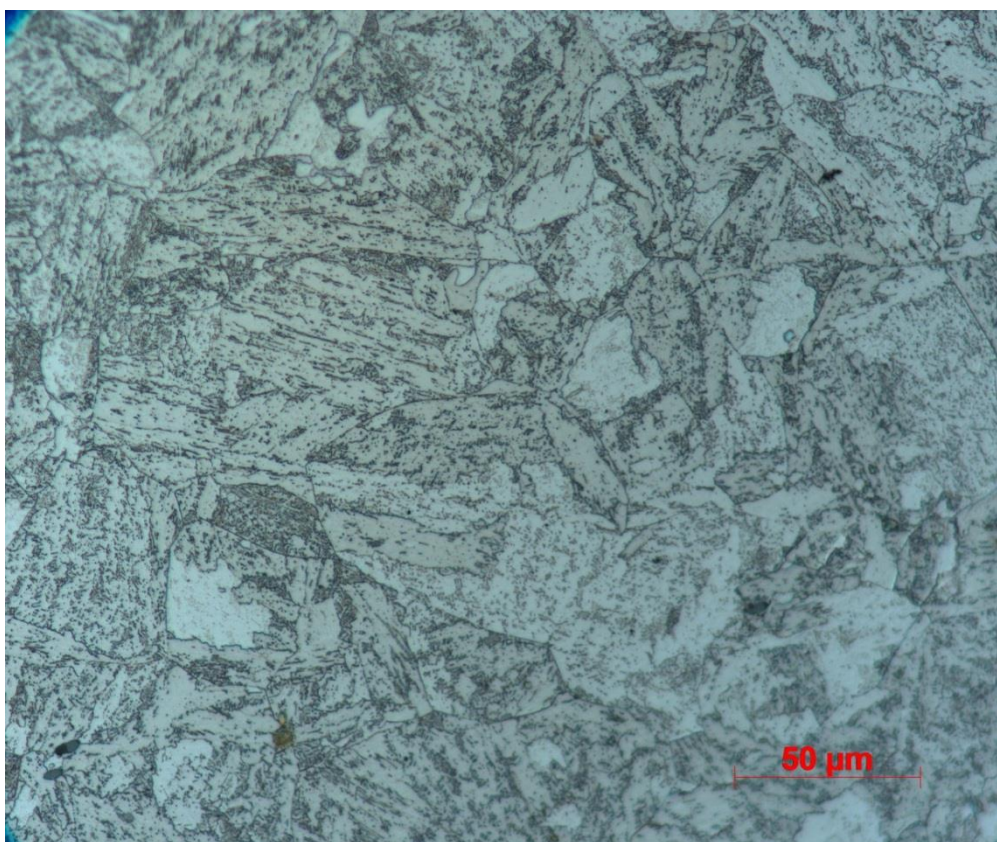
Konečným zpracováním této ocele je obvykle žihání při teplotě 670°C, po kterém je struktura tvořena především feritem a bainitem (viz obr. 14). Po různých teplotách a dobách žihání došlo ke změnám ve struktuře.

U stavu označeném 0 (575°C, 75,4 hod) je mikrostruktura tvořena bainitem a feritem s intergranulárně vyloučenými globulitickými útvary. U stavu 1 (575°C, 615,1 hod) došlo k výrazným změnám vlivem delšího času žihání. Je zde větší podíl feritu a v bainitické fázi došlo ke zhrubnutí karbidů, které dostávají jehlicovitý tvar (případně deskovitý). U stavu 2 (575°C, 1156 hod) a 3 (575°C, 1674,3) je struktura obdobná jako u stavu 1.

Další vzorky byly žihány při vyšších teplotách a kratších dobách. Stav 4 (600°C, 17,8 hod) a stav 5 (600°C, 136,9 hod) vykazuje mikrostrukturu, která je jakýmsi “mezistavem“ mezi strukturou stavu 0 a 1. Struktura stavu 6 má výraznější diferenciaci karbidů v bainitické fázi. Zde došlo k zhrubnutí karbidů, které jsou jasně odlišitelné. Ve feritických zrnech jsou přítomny sferoidizované karbidy. K vyloučení karbidů došlo i po hranicích zrn. Mikrostruktura stavu 7 (obr. 15) je obdobná jako u stavu 6.



Obrázek 14 Snímek struktury oceli 16236 stav VS, zvětšeno 500x, leptáno Nitalem



Obrázek 15 Snímek struktury oceli 16236 stav 7, zvětšeno 500x, leptáno Nitalem

3.2 Ocel 15CH2NMFA

Jedná se o nízkoлегovanou CrNiMoV ocel použitou pro výrobu prstenců tlakových nádob jaderného reaktoru VVER 1000. Tabulkové chemické složení této ocele je uvedeno v tab. 7.

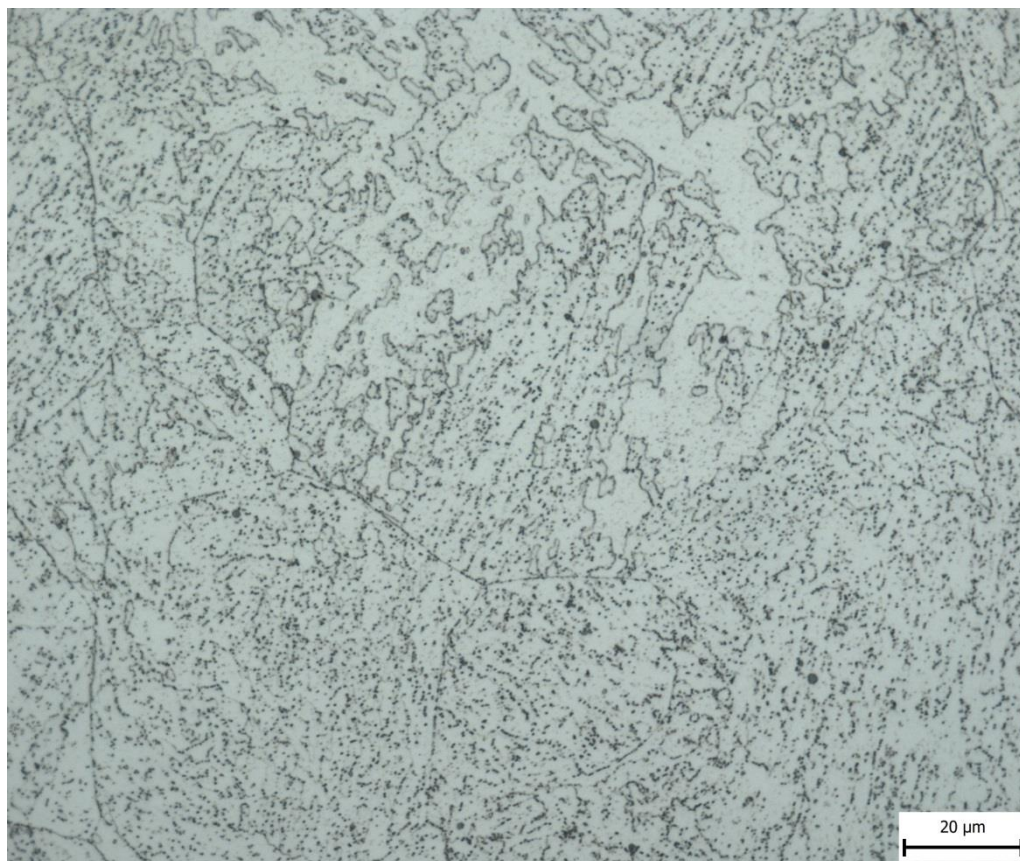
Zkušební tyče pro zkoušky únavy byly vyrobeny rozřezem plochých tyčí 50/75 x 250 x 12,5 mm skladovaných v archivu Mechanické zkušebny ÚVZÚ Škoda (VZÚ Plzeň) pod Laboratorním číslem 204 z roku 1984. Plochá zkušební tělesa pocházela z kovaných desek z ocele 15CH2NMFA skladovaných ve Škoda Jaderné strojírenství. Byl proveden kontrolní chemický rozbor (KMM/FST/ZCU), jehož výsledky jsou uvedeny v Tab. 8.

V tabulce 9 jsou uvedeny konkrétní chemické rozborů jiných taveb ocele 15CH2NMFA, které dokumentují reálný rozptyl chemického složení různých taveb dané ocele.

Metalografické snímky oceli 15CH2NMFA (viz obr. 16 a 17) i 16236 byly pořízeny v metalografické laboratoři RTI v Plzni.



Obrázek 16 Snímek struktury oceli 15CH2NMFA, zvětšeno 50x, leptáno Nitalem



Obrázek 17 Snímek struktury oceli 15CH2NMFA, zvětšeno 1000x, leptáno Nitalem

Tabulka 7 Tabulkové chemické složení oceli 15CH2NMFA

Prvek	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Co	As
Hm. %	0,13- 0,18	0,17- 0,37	0,3- 0,6	0,02	0,02	1,8- 2,3	1,0- 1,5	0,5- 0,7	Max 0,12	Max 0,15	Max 0,03	Max 0,04

Tabulka 8 Chemické složení plochých tyčí z oceli 15CH2NMFA, označení A23/5, výsledné hodnoty z pěti měření

Prvek	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Al
Hm. %	0,15± 0,008	0,42± 0,008	0,24± 0,007	0,01± 0,002	0,02± 0,002	2,32± 0,077	1,26± 0,015	0,62± 0,001	0,08± 0,001	0,08± 0,002	0,01± 0,01

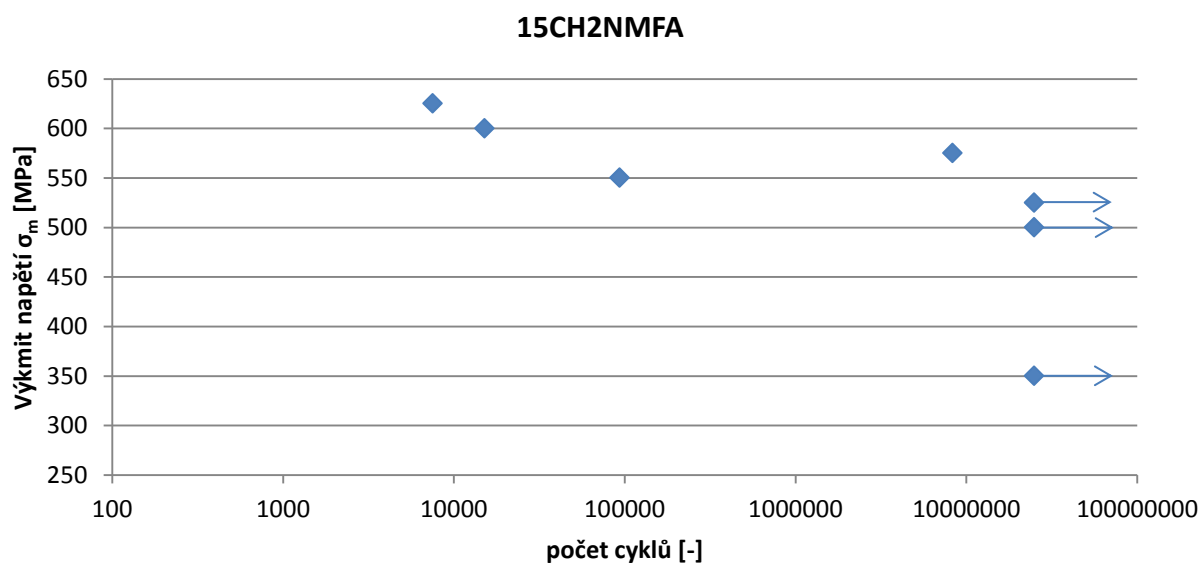
Tabulka 9 Reálné chemické složení několika taveb ocele 15CH2NMFA.

Ozn. tavby	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu
HB	0,18	0,44	0,27	0,007	0,007	2,16	1,26	0,05	0,57	0,10
SB	0,15	0,37	0,25	0,006	0,006	2,06	1,23	0,05	0,57	0,10
PL	0,15	0,46	0,33	0,007	0,009	2,14	1,23	0,05	0,57	0,11

Tento materiál byl ve formě hladkých válcových tyčí o průměru 8 mm podroben cyklickému namáhání při různých úrovních amplitudy napětí, viz tabulka 10 a obr. 18. Hodnota asymetrie cyklu R byla zvolena 0,1. Z neporušených částí těchto tyčí byly poté vyrobeny standardní a miniaturní zkušební vzorky.

Tabulka 10 Přehled degradovaných stavů materiálu 15CH2NMFA

Označení vzorku (stavu)	Napětí [MPa]	Počet cyklů
1	350	25000000
2	500	25000000
3	600	15151
4	550	93548
5	625	7529
6	525	25000000
7	575	8325119



Obrázek 18 Graf závislosti velikosti největšího výkmitu napětí na počtu cyklů

4. Zkušební zařízení

Zkušební zařízení je ze zřejmých důvodů neodmyslitelnou součástí při testování mechanických vlastností materiálu. Výsledky zkoušky mohou být ovlivněni vlastnostmi tohoto zařízení, proto jsou v příslušných normách uvedeny rovněž požadavky na zkušební zařízení. Všechny zkoušky, kromě mininárazových zkoušek, byly provedeny v mechanické zkušebně Regionálního Technologického Institut v Plzni. Mininárazové vzorky byly zkoušeny ve firmě COMTES FHS.

4.1 Univerzální trhací stroj Zwick Roell Z 250

Na tomto zkušebním stroji (obr 19 a)) byly provedeny zkoušky tahem dle normy ČSN EN ISO 6892-1, SPT a M-TT. Jedná se o elektromechanický zkušební stroj, na kterém lze provádět široké množství zkoušek, jako jsou zkoušky tahem, tlakem, ohybem, apod. K měření podélných deformací slouží mechanický extensometr multXtens (obr. 19 b)). Raménka tohoto průtahoměru jsou v přímém kontaktu se zkoušeným vzorkem a tak dochází k přímému snímání délkových změn. Další možností měření podélného prodloužení je pomocí optického průtahoměru laserXtens HP (obr. 19 c)). Tento průtahoměr využívá kamerového systému pro snímání povrchu vzorku, který je osvětlen laserem. Výhodou jeho použití je bezkontaktní měření podélného prodloužení, a tak je možné ho využít pro zkoušky za vysokých teplot nebo tam, kde z hlediska přístupnosti není možné použít mechanický extensometr. Nevýhodou optického systému je nepřímé měření podélného prodloužení (menší přesnost než u mechanického extensometru) a nutnost odlišení rastru sledovaných oblastí od okolí.

Pro klasické zkoušky dle normy ČSN EN ISO 6892-1, byly použity čelisti pro závitové vzorky, standardně dodávané k tomuto stroji.

a)

b)

c)



Obrázek 19 a) Univerzální trhačí stroj Zwick Roell Z250; b) mechanické extensometr Zwick Roell MultXtens.PAC2; c) optický extensometr LaserXtens HP

Pro zkoušky SPT byl použit přípravek navržený pro tyto účely. Tento přípravek v rozloženém stavu je vidět na obr. 20 a skládá se z pouzdra (1), matice (2), lisovníku (3), lisovnice (4), kuličky (5) a děrovače (6). Postup při zakládání vzorku je následující:

- Vzorek se umístí do lisovnice, ve které je vybrání ve tvaru vzorku pro zajištění přesné polohy
- Lisovnice se vzorkem je vsunuta do pouzdra (vzorek na horní části lisovnice)
- Do pouzdra je vsunut lisovník, který přitlačí vzorek na lisovnici
- Do lisovníku je vložena kulička
- Další je našroubována a dotažena matice do pouzdra
- Do přípravku je vsunut děrovač

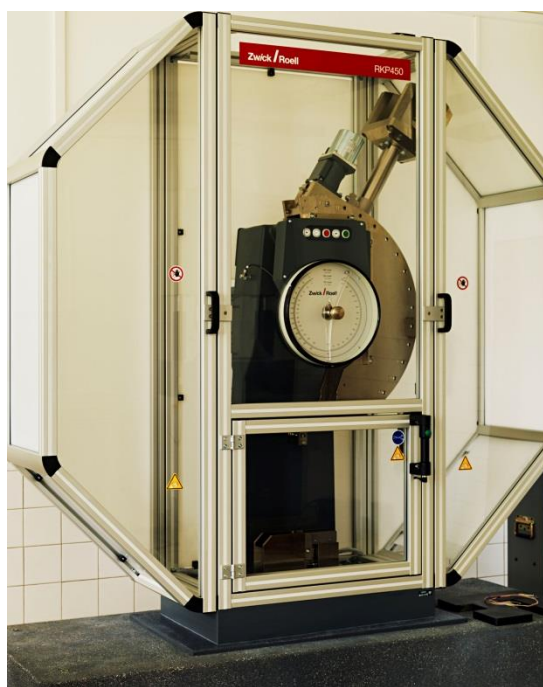


Obrázek 20 Rozložený přípravek pro SPT zkoušky

Pro zkoušky minitahových vzorků byly navrženy a vyrobeny přípravky, které umožňují bezpečné uchycení zkoušených vzorků. K přenosu síly na vzorek je využito tvarového styku mezi čelistmi a vzorkem. Tento přípravek je složen z pěti částí. První částí je upínací tyč, která je sevřena v hydraulických čelistech zkušebního stroje. Ta je našroubována do druhé části- těla. Tělo je opatřené otvory pro vodící čepy. Vodící čepy jsou vloženy do otvorů při upínání přípravku do hydraulických čelistí zkušebního stroje, aby byla zajištěna souosost přípravků. Po upnutí jsou vodící čepy opět odstraněny, aby nedocházelo k tření čepů o tělo (třecí síla zapříčiňuje odchylky od měřené a reálné síly působící na vzorek). Další částí přípravku jsou tvarové čelisti. Ty mají vybrání umožňující uchycení a přenos síly na vzorek. Tato část přípravku byla zušlechťena pro zaručení pevnosti a otěruvzdornosti. Poslední částí jsou dorazy, na které je vzorek při vkládání domáčknut a tak je zaručena příčná poloha vzorku ve zkušebním přípravku.

4.2 Rázové kladivo Zwick Roell RKP 450

Na tomto stroji (obr. 21) byly provedeny zkoušky rázem v ohybu dle normy ČSN EN ISO 147-1 a ČSN EN ISO 14556. Pro zkoušky bylo použito kladivo typu U o energii 300J. Břit kladiva je osazen tenzometrickým snímačem síly pro získání průběhu síly při přeražení vzorku.



Obrázek 21 Rázové kladivo Z/R RKP 450

4.3 Pulzátor Zwick Roell 50 HFP 5100

Tento magnetorezonanční pulzátor (obr. 22) je určen pro zkoušky vysokocyklové únavy. Na tomto stroji proběhlo cyklické zatěžování zkušebních tyčí z materiálu 15CH2NMFA. Maximální kapacita silové buňky je 50 kN.



Obrázek 22 Magnetorezonanční pulzátor Z/R 50 HFP5100

5. Příprava vzorků

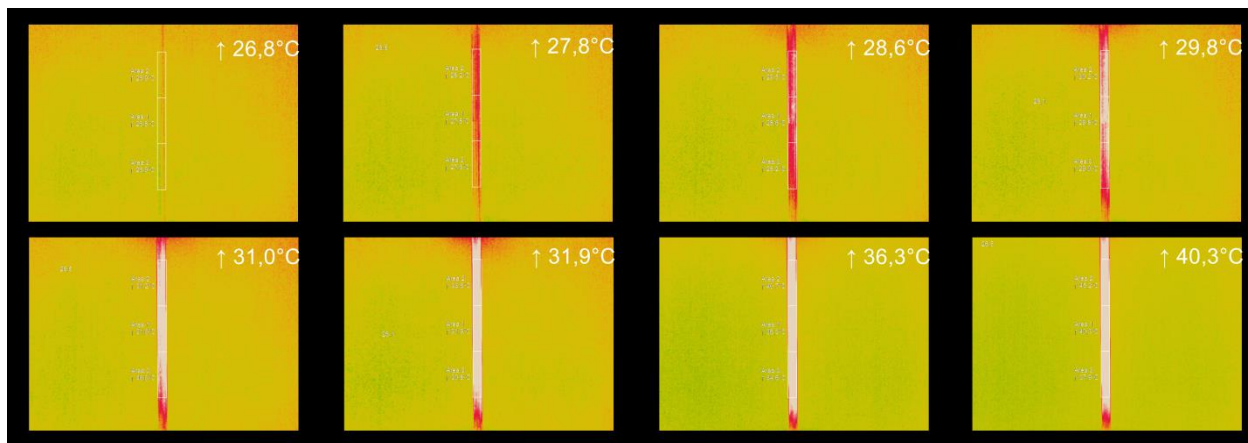
5.1 Dlouhé únavové tyče

Zkušební vzorky pro zkoušky únavy byly vyrobeny rozřezem plochých těles z oceli 15CH2NMFA. Plochá tělesa měla označení A23/2-5 a bylo z nich obráběním vyrobeno celkem 9 zkušebních tyčí (obr. 23), které byly následně podrobeny cyklickému namáhání.



Obrázek 23 Ukázka rozřezu plochých těles, z nichž byly vyrobeny dlouhé tyče (materiál 15CH2NMFA)

Během cyklování vzorků docházelo při vyšších hladinách napětí k ohřevu tyčí. Proto byl orientačně změřen průběh ohřívání zkušebního tělesa pomocí termokamery. Snímání bylo spuštěno při startu zkoušky a měření probíhalo po celou dobu trvání zkoušky. Výkmit amplitudy napětí byl nastaven na 600 MPa při asymetrii cyklu $R=0,1$. Na obrázku 24 jsou vidět jednotlivé snímky, pořízené termokamerou. Časový rozestup jednotlivých snímků je 40 sekund.



Obrázek 24 Snímky pořízené termokamerou při měření teploty vzorku při nakmitávání. Snímky jdou za sebou s rozestupem 40 s.

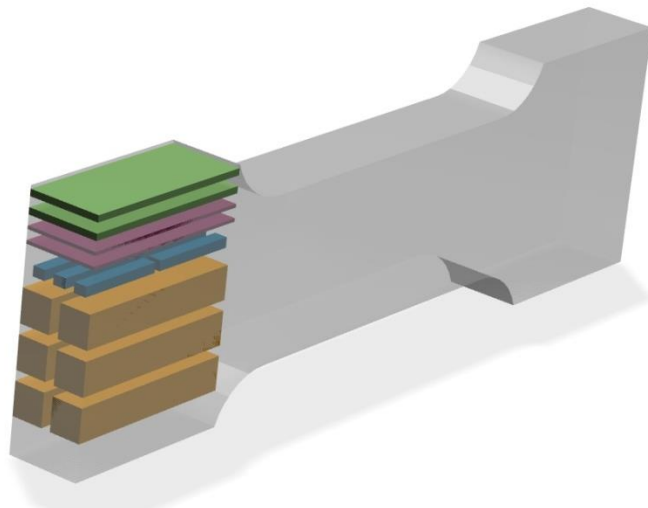
5.2 Rozřez zkušebních tyčí

Rozřezem tyčí byly získány zkušební vzorky, na nichž byl hodnocen degradovaný stav. Rozřez byl proveden dle možností rozvržení každého vzorku, protože pokud byl na tyči přítomný lom, muselo být změněno rozvržení zkušebních vzorků v tyči. Z důvodu omezeného prostoru pro výrobu všech typů zkušebních těles nebylo možné vyrobít v případě vzorků pro zkoušky tahem dle normy ČSN EN ISO 6892-1 a malých vzorků pro zkoušky rázové houževnatosti více, než dva zkušební vzorky. Pro zkoušky výchozího stavu byl proveden rozřez základního polotovaru (viz. obr.25 b)). Schematické znázornění rozložení vzorků je vidět na obr 25 a). Na těchto obrázcích náleží jednotlivé barvy různým vzorkům. Oranžová pro klasické tahové vzorky, zelená pro minitahové vzorky, modrá pro rázové vzorky a fialová pro vzorky SPT.

a)



b)

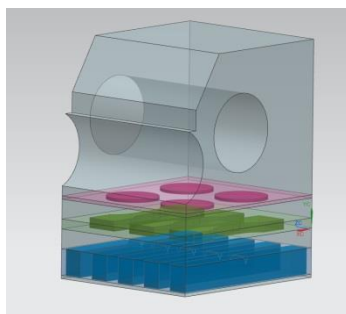


Obrázek 25 a) Ukázka rozmístění vzorků v dlouhé tyči oceli 15CH2NMFA; b) ukázka rozřezu výchozího stavu oceli 15CH2NMFA

Na vzorcích byl orientačně proveden metalografický rozbor únavové tyče č. 7. Na této tyči byl přítomen lom, proto byl rozbor proveden v blízké oblasti lomu a v místě závitů, kde působí tlakové namáhání při malých napětích (cca 50 Mpa). Rozřez byl proveden v kolmém směru ke směru hlavního namáhání tyče. Struktury v místě závitů a v místě lomu si byly velmi podobné a nebyly zde patrné rozdíly v deformaci zrn či jiné strukturální diference

5.3 Rozřez CT těles

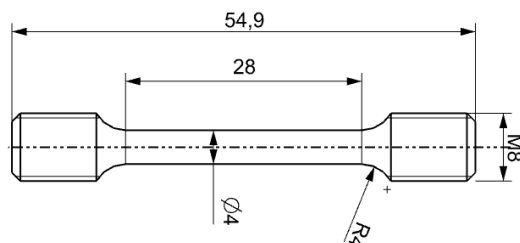
Jako základní polotovary byly materiály 16 236 k dispozici ve tvaru těles CT pro zkoušky lomové houževnatosti. Rozřez malých zkušebních těles byl proveden dle obr. 26. Počet a rozmístění bylo voleno tak, aby z každého kusu bylo možné vyrobit co nejvíce vzorků a zároveň byly zachovány směry orientací vzorků. Při rozřezu těchto těles bylo možné vyrobit dvě tyče pro zkoušky tahem o průměru 4 mm a celkové délce 55 mm a dvě tyče pro zkoušky rázem v ohybu o rozměrech 10x10x55 mm. Poté ze zbytku byla vyrobena miniaturní zkušební tělesa pro minitahové, mininázarové a SPT zkoušky (rozměry a geometrie viz níže).



Obrázek 26 Ukázka rozložení malých vzorků v CT tělese z materiálu 16236

5.4 Vzorky pro zkoušky tahem

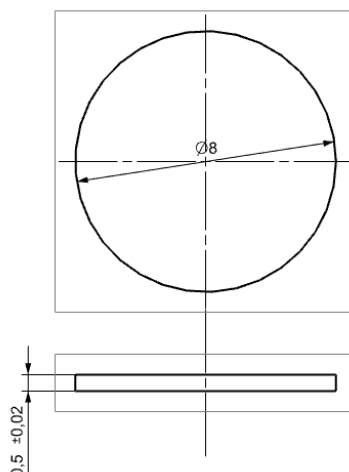
Pro zkoušky tahem byly navrženy vzorky v souladu s normou ČSN EN ISO 6862-1. Jedná se o zkušební tyče kruhového průřezu o průměru 4 mm a délkou zkoušené části 28 mm, viz obr. 27. Tyto vzorky byly vyrobeny obráběním. Vzorky byly upevněny do čelistí zkušebního stroje pomocí závitů M8.



Obrázek 27 Výkres vzorku pro zkoušky tahem dle normy ČSN EN ISO 6892-1

5.5 Vzorky pro zkoušky SPT

Pro zkoušky SPT byly vyrobeny nejběžněji používané vzorky, a to o průměru 8 mm a tloušťce 0,5 mm (viz obr. 28). U materiálu 15CH2NMFA byl vzorek vyroben odříznutím z dlouhé tyče a následným broušením. U materiálu 16 236 byl nejprve z CT těles vyroben plíšek, ve kterém byly následně vzorky vyřezány elektrojiskrovým obráběním. Každý vzorek byl poté ručně broušen pomocí brusných papírů se zrnitostí 240, 400, 600, 800 a 1200.

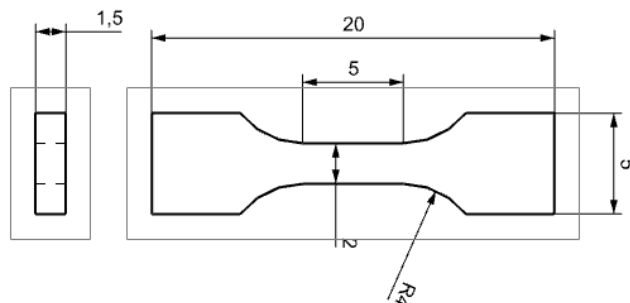


Obrázek 28 Výkres vzorku pro zkoušky SPT

5.6 Minitahové vzorky (M-TT)

Geometrie a rozměry vzorku použitého pro minitahové zkoušky jsou vidět na obr. 29. Vzorek obdélníkového průřezu se zkoušenou částí o tloušťce 1,5 mm a šířce 2 mm. Délka zkoušené části je 5 mm. Vstupním polotovarem pro výrobu vzorků z oceli 16 236 byl broušený plíšek, ze kterého byl následně elektrojiskrovým obráběním vytvořen požadovaný

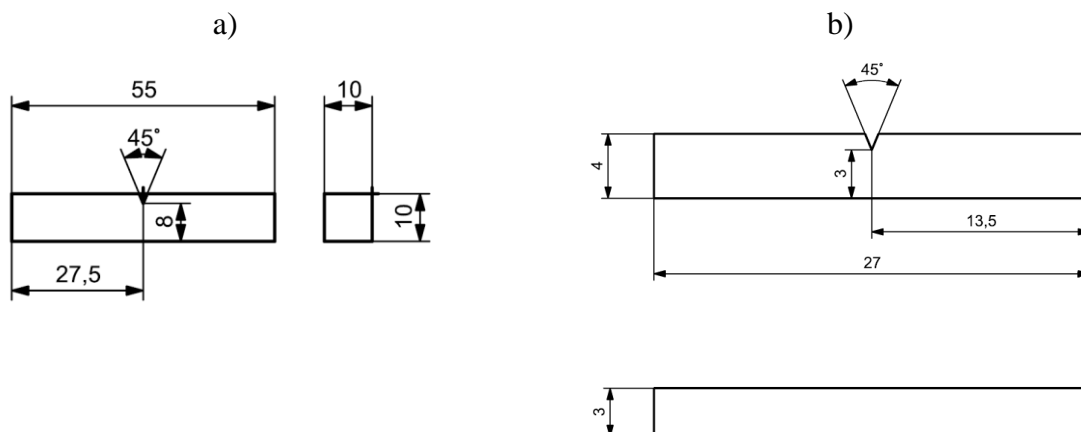
tvár. Pro ocel 15CH2NMFA byly vzorky vyřezány přímo ze zkušební tyče, rovněž použitím elektrojiskrového obrábění. Tento způsob výroby byl vybrán pro jeho vysokou rozměrovou a geometrickou přesnost. Při geometrických odchylkách v průřezu vzorku může dojít k obtížnému a nepřesnému měření. Tyto odchylky mají u takto malých vzorků větší vliv na výsledné hodnoty nežli u klasických vzorků.



Obrázek 29 Výkres vzorku pro minitahové zkoušky

5.7 Vzorky pro zkoušky vrubové houževnatosti

Pro zkoušky rázem v ohybu byly vyrobeny dva typy zkušebních těles. Klasické vzorky měly rozměry 10x10x55 mm (viz obr. 30 a)). Malé vzorky pro tyto zkoušky měli rozměry 3x4x27 mm (viz obr. 30 b)). Tyto vzorky byly u obou polotovarů odříznuty pomocí metalografické pily a následně broušeny na požadované rozměry. Na vzorcích je přítomen vrub typu V s úhlem rozevření 45°. U klasických zkušebních vzorků má hloubku 2 mm a u malých vzorků 1 mm. Vrub byl vytvořen tvarovou frézou.

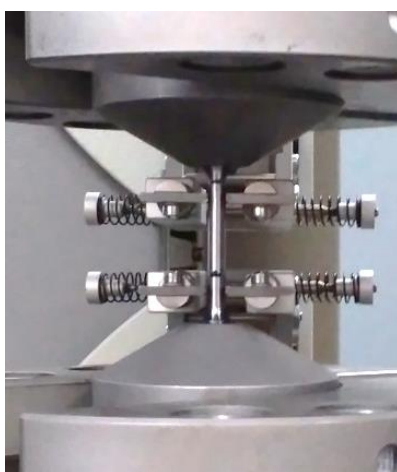


Obrázek 30 a) Klasický vzorek pro zkoušky rázem v ohybu; b) malý vzorek pro zkoušky rázem v ohybu

6. Interpretace výsledků

6.1 Zkoušky tahem

Zkoušky proběhly na trhacím stroji, viz. Kap. Xx, dle normy ČSN EN ISO 6892-1. Pro měření podélného prodloužení byl použit mechanický průtahoměr. Počáteční měřená délka L_0 byla 20 mm. Zkouška byla řízena dle metody A příslušné normy, a tedy rychlostí deformace. Do meze kluzu měřeného vzorku byla řídicím parametrem velikost deformace snímaná mechanickým průtahoměrem. Po mezi kluzu je řízení deformace převzato z dráhy příčnicku. Součástí zkoušek materiálu 16236 byly i zkoušky za zvýšené teploty, konkrétně 500 °C. Tyto zkoušky by měli reflektovat mechanické vlastnosti při reálných pracovních podmínkách parních turbín. Pracovní uspořádání zkoušky je vidět na obr. 31. V tab. 11-13 jsou uvedeny výsledky zkoušek



Obrázek 31 Pracovní uspořádání zkoušky tahem dle ČSN EN ISO 6892-1

Tabulka 11 Výsledky tahových zkoušek oceli 15CH2NMFA dle ČSN EN ISO 6892-1

stav	vz. č.	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	$A_{5,65}$ [%]	stav	vz. č.	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	$A_{5,65}$ [%]
V	1	537	656	19,8	4	1	567	640	22,3
	2	538	658	21,7		2	572	644	22,0
	3	535	652	20,7		Průměr	570 ± 4	642 ± 3	$22,2 \pm 0,2$
	4	532	650	19,9	5	1	632	672	19,1
	5	536	655	20,3		2	636	671	20,8
	6	536	656	21,1		Průměr	634 ± 2	671 ± 0	$19,9 \pm 1,3$
	Průměr	536 ± 2	655 ± 3	$20,5 \pm 0,7$	6	1	537	657	21,1
1	1	519	635	23,7		2	536	655	23,4
	2	510	631	26,2		Průměr	536 ± 1	656 ± 1	$22,3 \pm 1,6$
	Průměr	515 ± 6	633 ± 3	$25,0 \pm 1,8$	7	1	560	651	21,8
2	1	534	647	21,1		2	555	651	22,1
	2	533	647	21,4		Průměr	557 ± 3	651 ± 0	$21,9 \pm 0,2$

	Průměr	533 ± 0	647 ± 0	21,3 ± 0,2	
3	1	616	659	19,2	
	2	611	657	17,8	
	Průměr	613 ± 4	658 ± 2	18,5 ± 1,0	

Tabulka 12 Výsledky tahových zkoušek oceli 16 236 dle normy ČSN EN ISO 6892-1

stav	vz. Č.	R _{p0.2} [Mpa]	R _m [Mpa]	A _{5,65} [%]
V	1	761	889	16,9
	2	725	854	9,1
	Průměr	743 ± 26	871 ± 25	13,0 ± 5,5
0	1	712	855	16,6
	2	736	872	16,9
	Průměr	724 ± 17	863 ± 12	16,7 ± 0,18
1	1	723	858	15,6
	2	697	844	17,6
	Průměr	710 ± 18	851 ± 9,8	16,6 ± 1,35
2	1	722	855	14,7
	2	721	857	16,6
	Průměr	721 ± 0,7	856 ± 1,5	15,6 ± 1,32
3	1	674	813	17,1
	2	675	813	16,9
	Průměr	675 ± 0,6	813 ± 0,2	17,0 ± 0,12
4	1	685	816	18,8
	2	670	813	19,4
	Průměr	678 ± 11	815 ± 1,9	19,1 ± 0,41
5	1	696	819	15,9
	2	753	879	16,4
	Průměr	724 ± 40	849 ± 42	16,2 ± 0,39
6	1	686	831	16,5
	2	684	828	16,6
	Průměr	685 ± 1,9	829 ± 2,3	16,6 ± 0,05
7	1	734	857	16,8

	2	702	831	16,7
	Průměr	718 ± 23	844 ± 19	16,8 ± 0,07

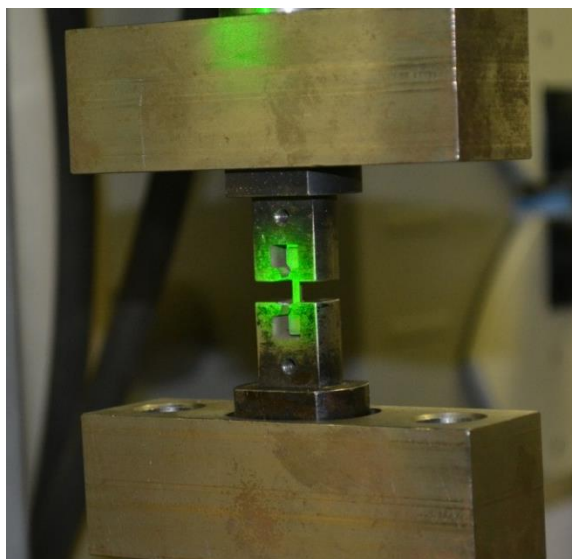
V tabulce 13 jsou uvedeny výsledky tahových vlastností ocele 16236 při teplotě 500°C. Tato teplota reálné provozní teplotě parních turbín, kde je tento materiál využíván.

Tabulka 13 Výsledky tahových zkoušek oceli 16 236 při 500 °C

Stav	R _{p0.2} [MPa]	R _m [MPa]	A _{5,65} [%]
0	724	863	16,7
1	710	851	16,6
2	721	856	15,6
3	675	813	17,0
4	678	815	19,1
5	724	849	16,2
6	685	829	16,6
7	718	844	16,8

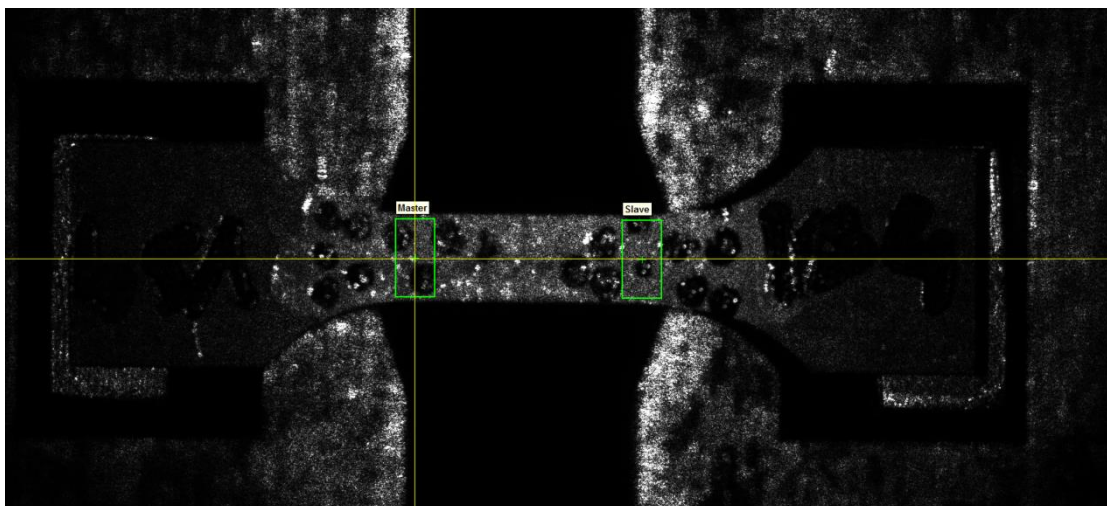
6.2 Minitahové zkoušky

Při zkoušení minitahových vzorků bylo využito tvarového styku mezi čelistmi a vzorkem. To je jeden z dalších důvodů, proč musely být vzorky vyrobeny velmi přesně, neboť při nerovnoměrně rozloženém napětí ve styku vzorku s čelistmi by docházelo k nerovnoměrné deformaci ve zkoušeném objemu materiálu. To bylo potvrzeno i při experimentu, kde byly minitahové vzorky vyrobeny vyříznutím vodním paprskem. Zde docházelo k podříznutí hrany vzorku vlivem rozšiřujícího se paprsku a tím nedokonalému přenesení síly na celou stykovou plochu. To se odrazilo jak na měření prodloužení, tak na hodnotách mechanických vlastností. Pro tyto zkoušky byly navrženy upínací čelisti, které umožňují jak přenos síly na vzorek tak měření podélného prodloužení optickým průtahoměrem. Pracovní uspořádání zkoušky je vidět na obr. 32.



Obrázek 32 Pracovní uspořádání zkoušky tahem minitahových vzorků

Minitahové vzorky byly před zkoušením změřeny a opatřeny značkami pro zlepšení rozlišení rastru na vzorku sledovaného průtahoměrem. Poté byl vzorek vložen do upínacích čelistí a nastaveny sledované oblasti (počáteční měřená délka $L_0 = 5$ mm). Ukázka snímku pořízeného sledováním optickým průtahoměrem je vidět na obr. 33.



Obrázek 33 Záznam z optického extensometru Z/R LaserXtens HP s patrnými značkami na vzorku

Výsledky zkoušek jsou vidět v tab. 14 a 15.

Tabulka 14 Výsledky zkoušek minitahových vzorků oceli 15CH2NMFA

stav	vz. č.	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]
V	1	485	614	31,7
	2	474	610	34,5
	3	499	620	32,3

	4	485	617	34,9
	5	469	614	34,1
	Průměr	482 ± 12	615 ± 4	33,5 ± 1,4
1	1	475	605	38,2
	2	471	604	37,9
	3	473	599	35,6
	Průměr	473 ± 2	603 ± 3	37,2 ± 1,4
2	1	488	625	34,5
	2	499	632	34,0
	3	483	625	31,6
	Průměr	490 ± 8	627 ± 4	33,4 ± 1,6
3	1	606	645	29,8
	2	597	647	31,9
	3	587	645	34,1
	Průměr	597 ± 9	645 ± 1	31,9 ± 2,151
4	1	575	631	35,9
	2	568	631	35,9
	3	569	632	35,4
	Průměr	571 ± 4	631 ± 1	35,8 ± 0,3
5	1	626	655	25,0
	2	628	661	32,5
	3	630	659	32,3
	Průměr	628 ± 2	658 ± 3	29,9 ± 4,3
6	1	519	644	35,3
	2	508	642	35,0
	3	506	640	31,4
	Průměr	511 ± 7	642 ± 2	33,9 ± 2,2
7	1	534	635	33,6
	2	526	634	36,5
	3	526	635	34,8
	Průměr	528 ± 5	635 ± 0	35,0 ± 0,1

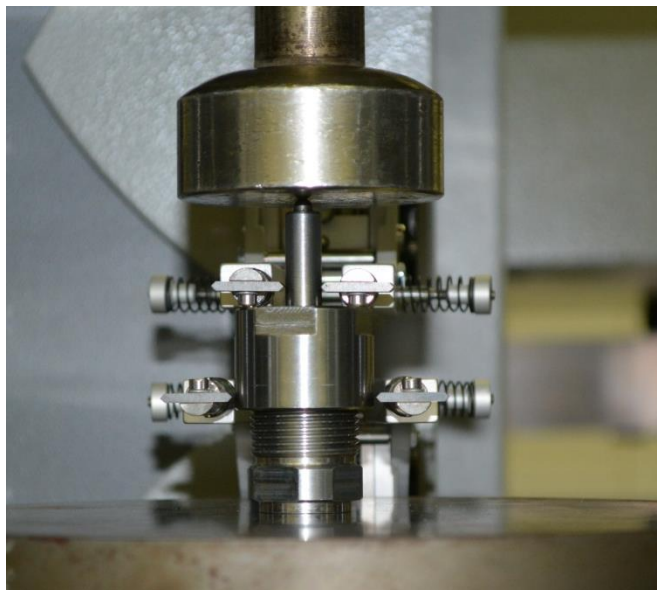
Tabulka 15 Výsledky zkoušek minitahových vzorků oceli 16236

stav	vz. č.	R _{p0.2} [MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [%]
V	1	746	866	23,1
	2	713	834	20,2
	3	714	841	23,3
	4	656	798	24,7
	průměr	707 ± 37	835 ± 28	22,8 ± 1,9
0	1	667	811	24,4
	2	738	853	21,0
	3	755	868	22,0
	4	648	788	24,7
	průměr	702 ± 53	830 ± 37	23,0 ± 1,8
1	1	697	835	23,7
	2	704	834	23,8
	3	710	845	24,4
	4	691	825	22,1
	průměr	701 ± 8,2	835 ± 8,2	23,5 ± 0,99
2	1	656	791	23,5
	2	687	808	12,0
	3	652	797	21,1
	4	653	792	24,8
	průměr	662 ± 17	797 ± 7,7	20,3 ± 5,78
3	1	662	800	20,8
	2	666	801	23,3
	3	670	804	23,2
	4	664	807	21,9
	průměr	666 ± 3,7	803 ± 3,1	22,3 ± 1,15
4	1	678	804	24,7
	2	676	801	24,8
	3	670	799	24,8
	4	675	802	25,9

	průměr	674 ± 3,3	802 ± 1,8	25,1 ± 0,58
5	1	735	867	23,9
	2	740	865	23,8
	3	740	859	23,6
	4	722	837	21,5
	průměr	734 ± 8,7	857 ± 14	23,2 ± 1,14
6	1	660	812	22,9
	2	668	812	22,7
	3	661	810	24,2
	4	660	810	24,0
	průměr	662 ± 4	811 ± 1,1	23,4 ± 0,75
7	1	697	822	24,3
	2	699	822	21,8
	3	690	823	25,2
	průměr	695 ± 4,8	822 ± 0,6	23,7 ± 1,75

6.3 Zkoušky SPT

Při zkouškách SPT byl vzorek vložen do přípravku (kap 4.1.) a zatěžován až do porušení. Při této zkoušce může ovlivnit výsledky mnoho faktorů, jejichž účinky pozorovalo mnoho autorů [25, 32, 58]. To bylo bráno v potaz při samotném zkoušení SPT. Při zkoušce byl na přípravek připnut mechanický extenzometr v místě matice a v místě děrovače (viz obr. 34). Rychlost zatěžování byla řízena extenzometrem a nabývala hodnoty 1 mm/min. Provedené zkoušky byly následně vyhodnoceny. Pro hodnocení smluvní meze kluzu bylo využito vztahu (12), který navrhl Mao a Takahashi [6] a je součástí CEN ustanovení pro SPT. Vztahy pro určení meze pevnosti (13) a tažnosti (14) byly rovněž použity z uvedeného ustanovení. Výsledky vyhodnocení je možné vidět v tab. 16 a 17.



Obrázek 34 Pracovní uspořádání SPT zkoušek

Tabulka 16 Výsledky zkoušek SPT z materiálu 15CH2NMFA

stav	vz. č.	$\beta_{Rp0.2}$	β_{Rm}	γ
V	1	0,562	0,385	11,9
	2	0,427	0,372	12,1
	3	0,403	0,425	10,1
	Průměr	0,464 ± 0,086	0,385 ± 0,028	11,4 ± 1,1
1	1	0,411	0,414	11,9
	2	0,426	0,412	12,4
	3	0,362	0,390	12,2
	Průměr	0,400 ± 0,033	0,412 ± 0,013	12,2 ± 0,3
2	1	0,380	0,396	10,8
	2	0,413	0,385	10,9
	3	0,404	0,387	10,9
	Průměr	0,399 ± 0,017	0,387 ± 0,006	10,9 ± 0,1
3	1	0,481	0,399	9,8
	2	0,446	0,413	9,2
	3	0,442	0,385	9,6
	Průměr	0,456 ± 0,021	0,399 ± 0,014	9,5 ± 0,3
4	1	0,388	0,403	10,8

	2	0,407	0,395	10,9
	3	0,432	0,409	11,1
	Průměr	0,409 ± 0,022	0,403 ± 0,007	10,9 ± 0,2
5	1	0,411	0,387	12,0
	2	0,432	0,394	11,5
	3	0,470	0,375	12,4
	Průměr	0,438 ± 0,030	0,387 ± 0,010	11,9 ± 0,5
6	1	0,426	0,458	11,3
	2	0,427	0,423	11,9
	3	0,350	0,412	11,9
	Průměr	0,401 ± 0,044	0,423 ± 0,024	11,7 ± 0,3
7	1	0,451	0,396	11,8
	2	0,439	0,408	11,3
	3	0,418	0,431	10,9
	Průměr	0,436 ± 0,017	0,408 ± 0,018	11,3 ± 0,5

Tabulka 17 Výsledky zkoušek SPT z materiálu 16236

stav	vz. č.	$\beta_{Rp0.2}$	β_{Rm}	γ
V	1	0,661	0,375	8,2
	2	0,679	0,365	8,4
	3	0,670	0,338	8,9
	průměr	0,670 ± 0,009	0,359 ± 0,019	8,5 ± 0,4
0	1	0,661	0,323	11,8
	2	0,635	0,332	11,2
	3	0,645	0,306	12,1
	průměr	0,647 ± 0,013	0,320 ± 0,013	11,7 ± 0,5
1	1	0,710	0,227	14,5
	2	0,626	0,250	12,1
	3	0,637	0,248	12,4
	průměr	0,658 ± 0,045	0,241 ± 0,012	13,0 ± 1,3
2	1	0,634	0,290	11,7
	2	0,721	0,275	13,7

	3	0,594	0,303	10,6
	průměr	0,650 ± 0,065	0,289 ± 0,014	12,0 ± 1,6
3	1	0,609	0,325	11,6
	2	0,626	0,333	11,2
	3	0,638	0,331	11,2
	průměr	0,625 ± 0,015	0,330 ± 0,004	11,3 ± 0,2
4	1	0,623	0,309	13,5
	2	0,655	0,299	14,2
	3	0,629	0,302	13,7
	průměr	0,636 ± 0,017	0,303 ± 0,005	13,8 ± 0,4
5	1	0,704	0,325	11,8
	2	0,683	0,330	11,8
	3	0,689	0,339	11,3
	průměr	0,692 ± 0,011	0,331 ± 0,007	11,6 ± 0,3
6	1	0,614	0,356	10,5
	2	0,611	0,350	10,7
	3	0,608	0,367	10,3
	průměr	0,611 ± 0,003	0,358 ± 0,009	10,5 ± 0,2
7	1	0,773	0,288	14,5
	2	0,652	0,322	11,7
	3	0,675	0,299	12,9
	průměr	0,700 ± 0,064	0,303 ± 0,017	13,0 ± 1,4

6.4 Rázové a minirázové zkoušky

Rázové zkoušky byly provedeny dle normy ČSN EN ISO 148-1 a ČSN EN ISO 14556.

Z hlediska rozsáhlosti výsledků budou v této práci uvedeny pouze průměrné hodnoty a odchylka a počet zkoušených vzorků pro zkoušky vrubové houževnatosti, a to v kapitole 7.

7. Diskuze výsledků

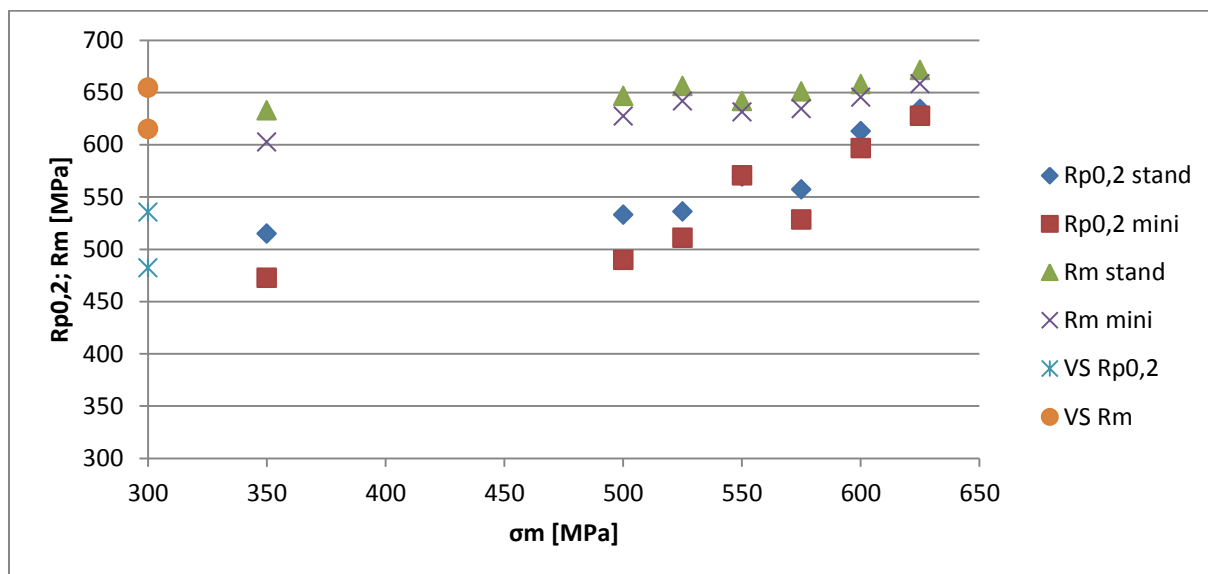
Po provedení zkoušek byla získaná data hodnocena. Při hodnocení byly sledovány odchylky od hodnot mechanických vlastností získaných na vzorcích dle příslušných norem. Stanovením těchto odchylek bylo následně možné vyhotovit korelace příslušející jednotlivým zkouškám.

Porovnáním smluvních mezí kluzu, mezí pevnosti a tažností, získaných na standardních a minitahových vzorcích lze určit velikost rozdílu těchto hodnot. Korelační koeficient pro jednotlivé stavy materiálu 15CH2NMFA je vidět v tab. 18. Tato tabulka je seřazena dle velikosti degradace materiálu, tzn. dle stavu nejbližšímu stavu výchozímu.

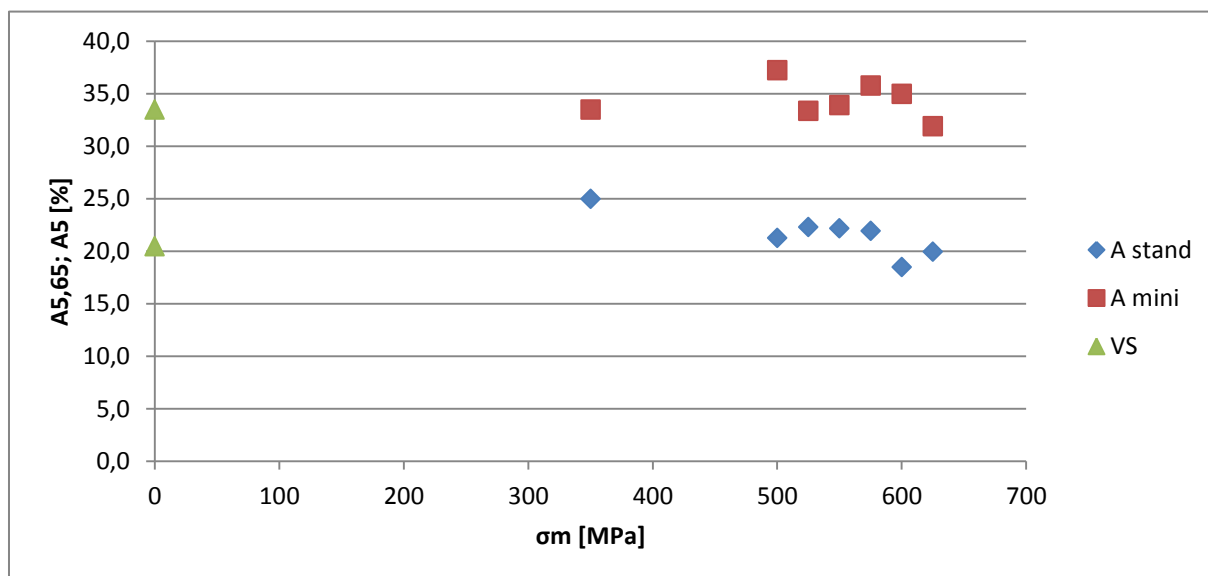
Tabulka 18 Porovnání mechanických vlastností získaných na standardních a minitahových vzorcích oceli 15CH2NMFA

stav	σ_m [Mpa]	$R_{p0,2}$			R_m			A		
		stand [Mpa]	mini [Mpa]	k_{kor} [-]	stand [Mpa]	mini [Mpa]	k_{kor} [-]	stand [Mpa]	mini [Mpa]	k_{kor} [-]
VS	-	536	482	0,900	655	615	0,939	20,5	33,5	1,636
1	350	515	473	0,918	633	603	0,952	25,0	37,2	1,491
2	500	533	490	0,919	647	627	0,970	21,3	33,4	1,569
6	525	536	511	0,953	656	642	0,978	22,3	33,9	1,521
4	550	570	571	1,002	642	631	0,984	22,2	35,8	1,613
7	575	557	528	0,948	651	635	0,975	21,9	35,0	1,594
3	600	613	597	0,973	658	645	0,981	18,5	31,9	1,725
5	625	634	628	0,990	671	658	0,981	19,9	29,9	1,501

Při pohledu na hodnoty mechanických vlastností, získaných na vzorcích dle normy ČSN EN ISO 6892-1 oceli 15CH2NMFA lze vidět, že mez pevnosti se se zvyšující se amplitudou napětí při cyklickém namáhání příliš nemění. U smluvní meze kluzu dochází k posunu směrem k vyšším hodnotám napětí a přiblížení k mezi pevnosti (viz obr. 35). To je zapříčiněno mikroplastickými deformacemi, doprovázejícími únavový cyklus, při kterých dochází k vyčerpání plasticity materiálu. Tažnost vykazuje mírnou tendenci ke snižování hodnot při vzrůstající amplitudě napětí (viz obr. 36), což lze podobně jako u meze kluzu vysvětlit vyčerpáním plasticity vlivem únavového poškození.



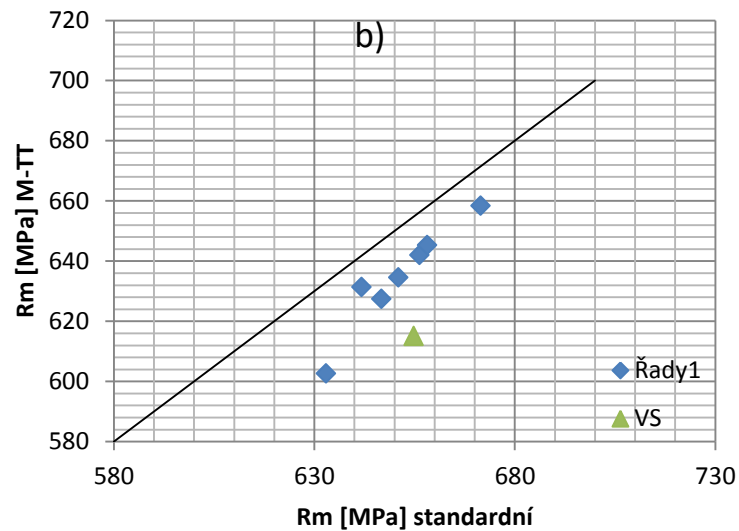
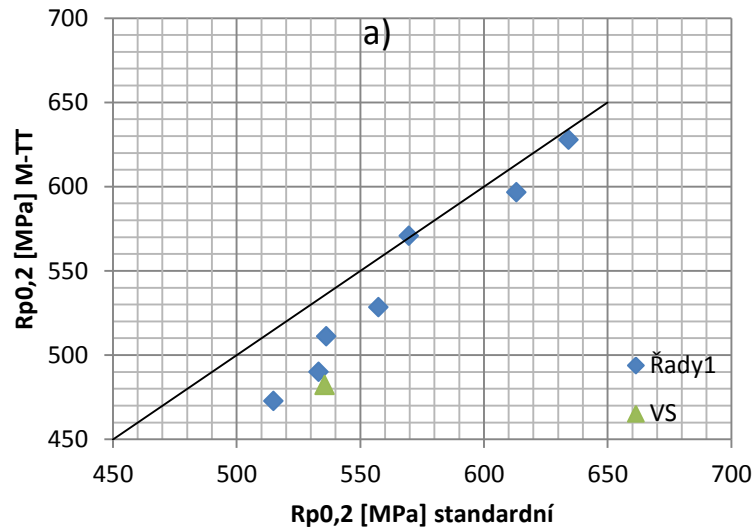
Obrázek 35 Hodnoty smluvní meze kluzu a meze pevnosti naměřené na standardních a minitahových vzorcích

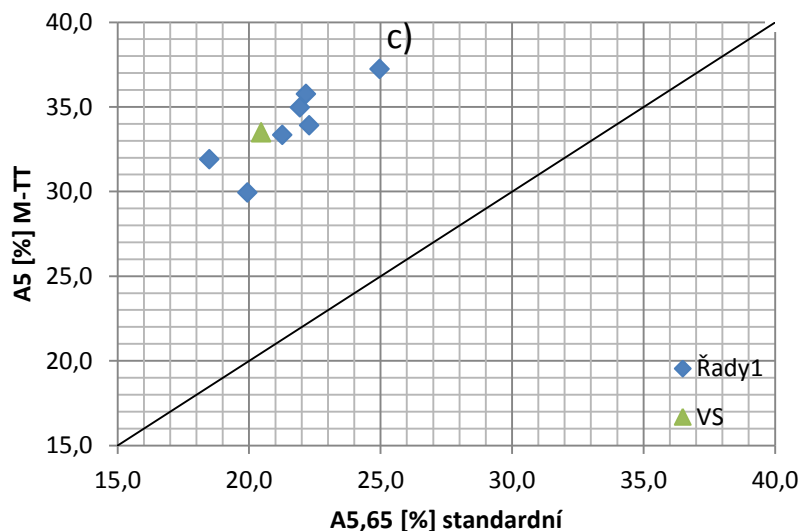


Obrázek 36 Hodnoty tažností naměřené na standardních a minitahových vzorcích

V tab. 18 lze vidět i hodnoty mechanických vlastností získaných na minitahových vzorcích. Rovněž je zde uvedena i velikost rozdílu v podobě korelačního koeficientu, který byl získán poměrem hodnot získaných na minitahových a standardních vzorcích. Z výsledků mezi kluzu a mezi pevnosti je zřejmé, že získané charakteristiky jsou téměř shodné a korelační koeficient nabývá téměř hodnoty jedna (při $k_{kor}=1$ jsou hodnoty mechanických vlastností stejné pro standardní i minitahové vzorky). Velikost odchylky je znázorněna graficky na obr. 37, kde na vodorovné ose jsou hodnoty smluvní meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti, získané na standardních vzorcích, a na svislé ose jsou hodnoty získané na minitahových zkouškách. V grafech je rovněž zobrazena přímka k , s předpisem $y=x$. Vynesené body odpovídají průměrné hodnotě mechanických vlastností různých stavů. Z těchto grafů lze vidět, že čím blíže k přímce k jsou vynesené body, tím menší je rozdíl mezi výsledky získaných na standardních a minitahových vzorcích. Na obr. 37 a) je znázorněna tato závislost pro smluvní mez kluzu. Zde lze vidět, že hodnoty získané na minitahových vzorcích jsou menší než hodnoty získané na standardních vzorcích a při zvyšujících se hodnotách meze kluzu (rostoucí amplituda napětí a kratší času do lomu při nakmitávání) se

rozdíl zmenšuje. Na obr 37 b), zobrazující rozdíly v mezích pevnosti, lze vidět, že i u meze pevnosti dochází k mírnému přiblížení hodnot napětí při vzrůstající amplitudě napětí cyklického namáhání. Hodnoty meze pevnosti jsou podobně jako v předchozím případě o něco menší v případě minitahových vzorků. Rozdíl v tažnostech je znázorněn na obr. 37 c). U tažnosti nedocházelo ke změně velikosti rozdílu pro jednotlivé stavy a při proložení bodů lineární přímkou je přibližně rovnoběžná s přímkou k.



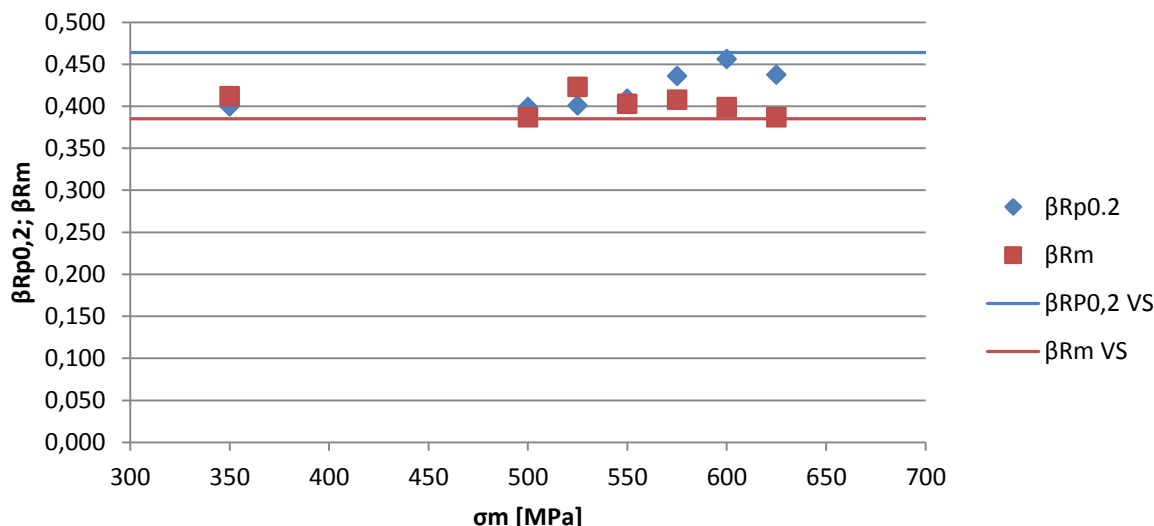


Obrázek 37 Grafické znázornění velikosti rozdílu a) smluvní meze kluzu, b) meze pevnosti, c) tažnosti, naměřené na standardních a minitahových vzorcích oceli 15CH2NMFA

Výsledky zkoušek SPT, uvedené v tabulce 19, byly rovněž vyneseny do grafu, který je vidět na obr. 38. Zde je vidět, že koeficient β_{Rm} je velmi podobný pro všechny stavy materiálu. Největší výchylka koeficientu β_{Rm} od žíhaného stavu materiálu nabývá hodnoty 0,038. U koeficientu $\beta_{Rp0,2}$ má největší výchylka hodnotu 0,065.

Tabulka 19 Výsledky zkoušek SPT

stav	σ_m [Mpa]	$\beta_{Rp0,2}$ [-]	β_{Rm} [-]	ν [-]
VS	0	0,464 ± 0,086	0,385 ± 0,028	11,4 ± 1,1
1	350	0,400 ± 0,033	0,412 ± 0,013	12,2 ± 0,3
2	500	0,399 ± 0,017	0,387 ± 0,006	10,9 ± 0,0
6	525	0,401 ± 0,044	0,423 ± 0,024	11,7 ± 0,3
4	550	0,409 ± 0,022	0,403 ± 0,007	10,9 ± 0,2
7	575	0,436 ± 0,017	0,408 ± 0,018	11,3 ± 0,5
3	600	0,456 ± 0,021	0,399 ± 0,014	9,5 ± 0,3
5	625	0,438 ± 0,030	0,387 ± 0,010	11,9 ± 0,5
průměr		0,420 ± 0,026	0,403 ± 0,013	11,2 ± 0,3



Obrázek 38 Koeficient $\beta_{Rp0,2}$ a β_{Rm} oceli 15CH2NMFA

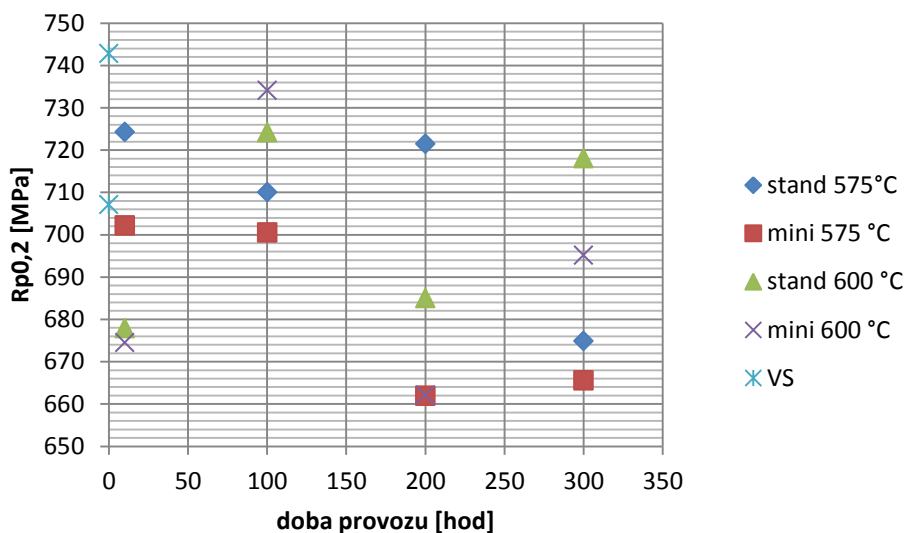
Porovnání výsledků zkoušek standardních a minitahových vzorků a korelační koeficient pro materiál 16 236 je vidět v tab. 20. Pro tento materiál je tabulka seřazena dle počtu nasimulovaných provozních hodin.

Tabulka 20 Porovnání mechanických vlastností naměřených na standardních a minitahových vzorcích z oceli 16236

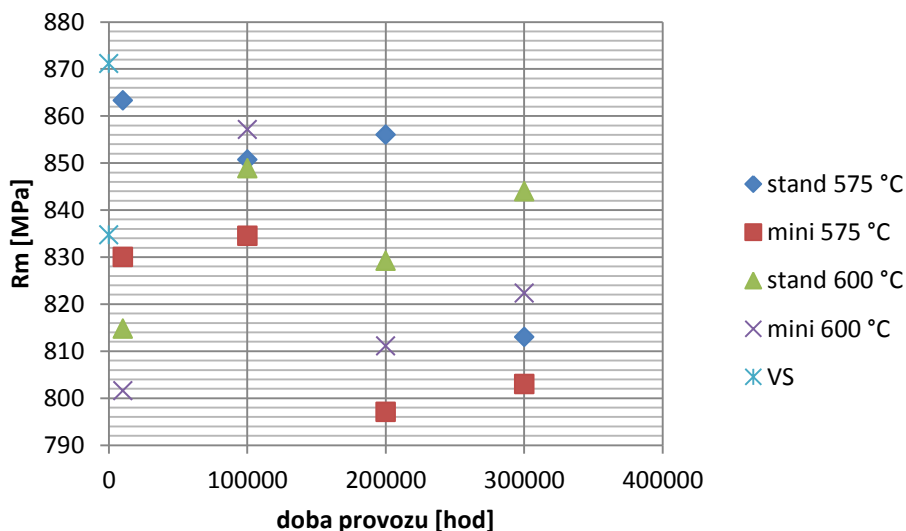
stav	žihací teplota	doba provozu	$R_{p0,2}$			R_m			A		
			stand	mini	k_{kor}	stand	mini	k_{kor}	stand	mini	k_{kor}
	[°C]	[hod]	[MPa]	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[-]	[%]	[%]	[-]
Vs	-	-	743	707	0,952	871	835	0,958	13,0	22,8	1,752
0	575	10000	724	702	0,969	863	830	0,961	19,1	23,0	1,204
4	600	10000	678	674	0,995	815	802	0,984	16,6	25,1	1,510
1	575	100000	710	701	0,987	851	835	0,981	16,6	23,5	1,415
5	600	100000	724	734	1,014	849	857	1,010	16,2	23,2	1,435
2	575	200000	721	662	0,918	856	797	0,931	15,6	20,3	1,302
6	600	200000	685	662	0,966	829	811	0,978	16,6	23,4	1,416
3	575	300000	675	666	0,986	813	803	0,988	17,0	22,3	1,314
7	600	300000	718	695	0,968	844	822	0,974	16,8	23,7	1,414

Hodnoty smluvní meze kluzu (obr. 39) a meze pevnosti (obr. 40) naměřené na standardních vzorcích ukazují malou relativní odchylku jednotlivých stavů. I přesto však hodnoty smluvní meze kluzu a meze pevnosti nevykazují se zvyšující se degradací materiálu (delší doba provozu) žádnou závislost. To samé platí i pro hodnoty získané na minitahových vzorcích, kde je ovšem poměrně velká relativní odchylka u stavu VS,0 a 5. Při pohledu na

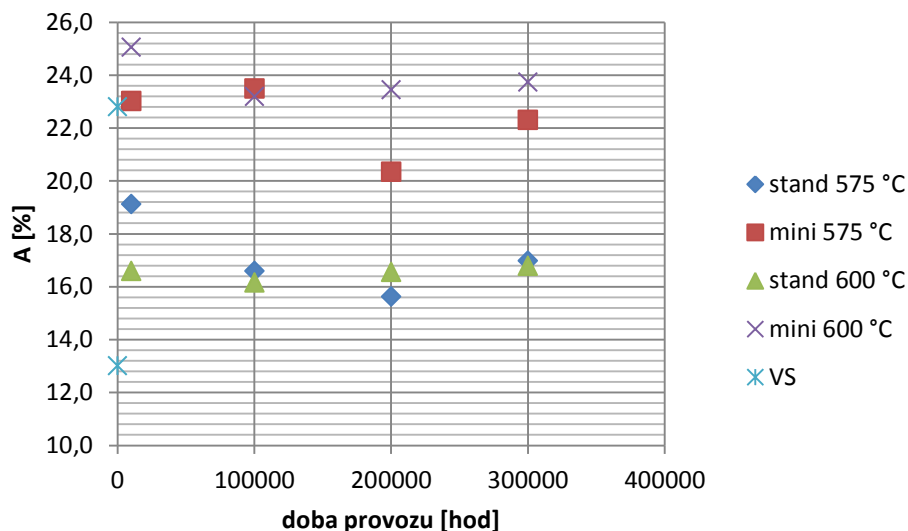
hodnoty tažností je vidět, že rozdíl hodnot stavů žíhaných při 575°C a 600°C již není tak nahodilý jako v případě smluvní meze kluzu a meze pevnosti, ale je zde určitá závislost, pro jejíž bližší určení by bylo nutné provést další série testů. Hodnoty tažností získaných na minitahových vzorcích tvoří obdobnou závislost jako hodnoty standardních vzorků a velikost rozdílu zůstává více či méně podobná. Stejně jako u přechozího materiálu je tažnost na minitahových vzorcích o něco vyšší než na standardních. Tažnosti jsou zobrazené na obr. 41.



Obrázek 39 Smluvní meze kluzu naměřené na standardních a minitahových vzorcích z oceli 16236

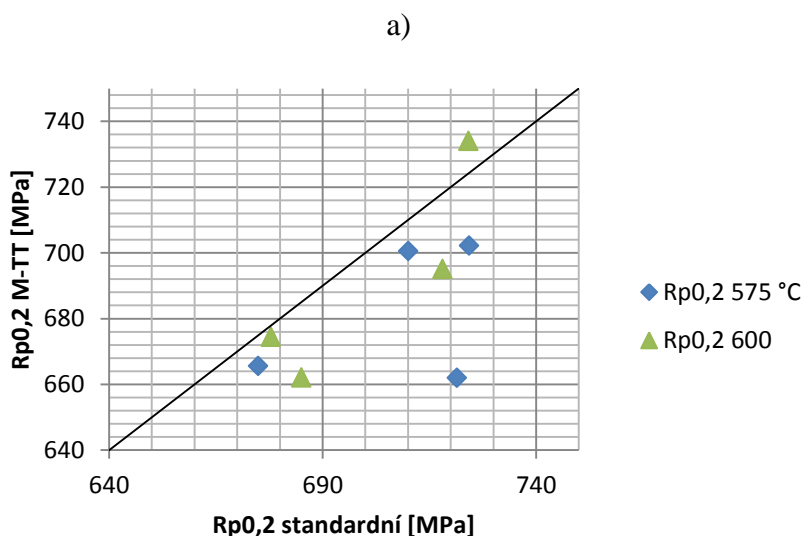


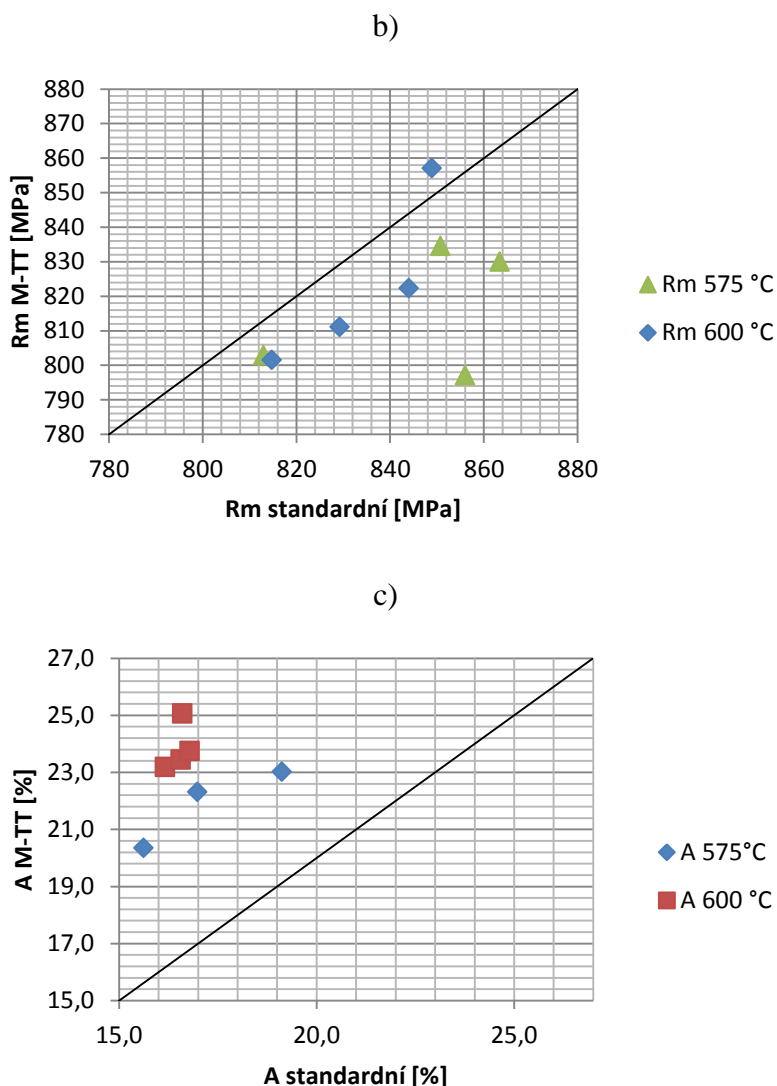
Obrázek 40 Meze pevnosti naměřené na standardních a minitahových vzorcích z oceli 16236



Obrázek 41 Tažnosti naměřené na standardních a minitahových vzorcích z oceli 16236

Na obr. 42 jsou znázorněny grafy, kde jsou na vodorovných osách vyneseny hodnoty mechanických vlastností získaných na standardních vzorcích a na svislé ose mechanické vlastnosti získané na minitahových vzorcích. Stejně jako u minulého materiálu je zde znázorněna přímka $k: y=x$. Odtud je patrné, že čím blíže jsou vynesené body k přímce k , tím menší je rozdíl v hodnotách mechanických vlastností těchto vzorků. Jak je vidět na obr. 42, smluvní mez kluzu je u minitahových vzorků spíše menší (obr 42 a)), stejně jako mez pevnosti (obr 42 b)), oproti tomu tažnosti jsou vždy větší (obr 42 c)).



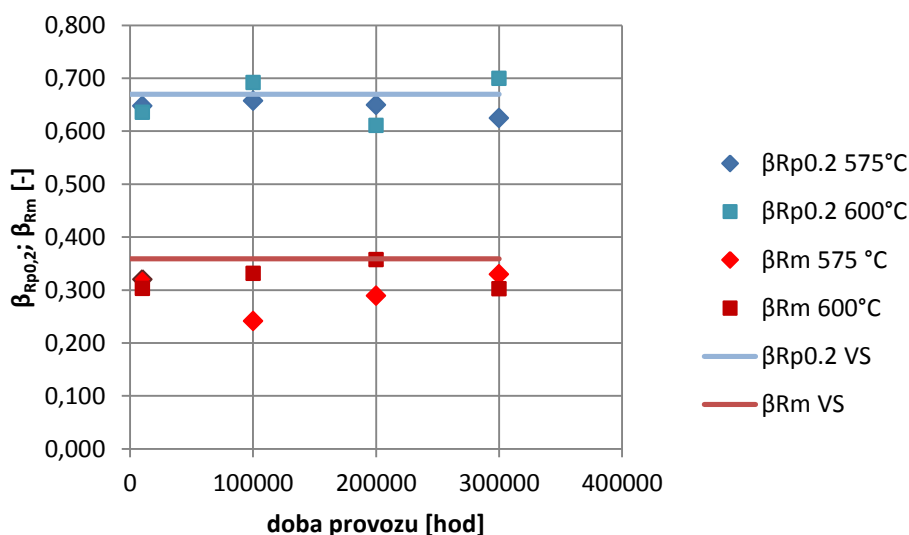


Obrázek 42 Grafické znázornění velikosti rozdílu a) smluvní meze kluzu, b) meze pevnosti, c) tažnosti, naměřené na standardních a minitahových vzorcích oceli 16236

Výsledky koeficientů $\beta_{Rp0,2}$, β_{Rm} a γ , vypočtených z naměřených dat SPT zkoušek materiálu 16236, jsou vidět v tab. 21 a na obr. 43. Při porovnání získaných hodnot s žíhaným (výchozím) stavem materiálu lze vidět, že koeficient $\beta_{Rp0,2}$ pro vzorky žíhané při 575°C s delší dobou provozu klesá a má největší odchylku 0,045. Pro vzorky žíhané při 600°C nabývá odchylka největší hodnoty 0,059 a není zde patrný žádný vliv nasimulované doby provozu. Žádný vliv doby provozu není patrný ani na koeficientu β_{Rm} naměřených na vzorcích žíhaných při obou teplotách. Koeficient β_{Rm} má pro vzorky žíhané při teplotě 575°C největší odchylku 0,118. Pro vzorky žíhané při 600°C pak 0,056.

Tabulka 21 Výsledky zkoušek SPT materiálu 16236

doba provozu [hod]	stav	$\beta_{Rp0.2}$ [-]	β_{Rm} [-]	γ [-]
0	VS	0,670 ± 0,009	0,359 ± 0,019	8,5 ± 0,4
10000	0	0,647 ± 0,013	0,320 ± 0,013	11,7 ± 0,5
10000	4	0,636 ± 0,017	0,303 ± 0,005	13,8 ± 0,4
100000	1	0,658 ± 0,045	0,241 ± 0,012	13,0 ± 1,3
100000	5	0,692 ± 0,011	0,331 ± 0,007	11,6 ± 0,3
200000	2	0,650 ± 0,065	0,289 ± 0,014	12,0 ± 1,6
200000	6	0,611 ± 0,003	0,358 ± 0,009	10,5 ± 0,2
300000	3	0,625 ± 0,015	0,330 ± 0,004	11,3 ± 0,2
300000	7	0,700 ± 0,064	0,303 ± 0,017	13,0 ± 1,4
průměr		0,654 ± 0,027	0,315 ± 0,011	11,722 ± 0,700

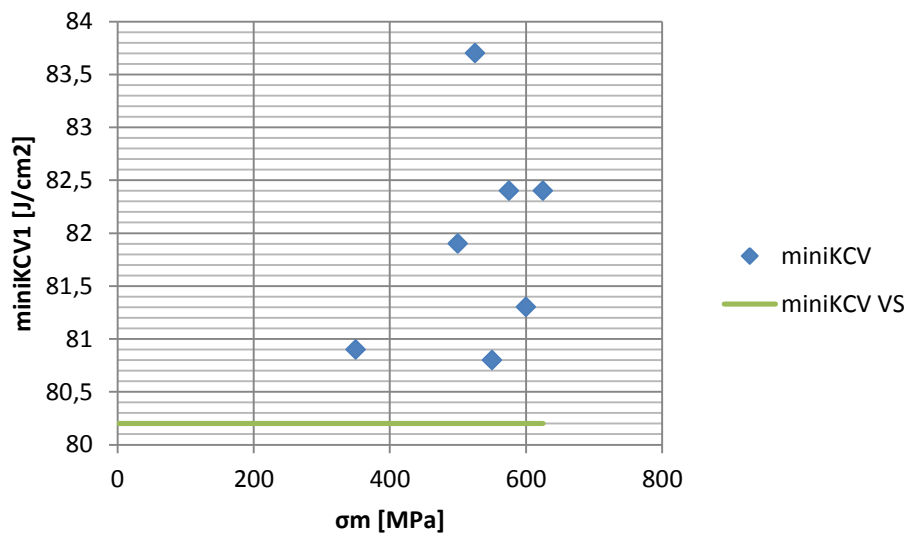


Obrázek 43 Koeficient $\beta_{Rp0.2}$ a β_{Rm} oceli 16236

Porovnáním výsledků vrubové houževnatosti, viz tab. 22, lze vidět, že u degradovaných stavů materiálu 15CH2NMFA byly hodnoty vrubových houževnatostí naměřené na minirázových vzorcích vždy vyšší než výchozí (žíhaný) stav této oceli. Hodnoty nevykazují žádnou závislost na velikosti degradace materiálu vlivem cyklického namáhání. Největší rozdíl hodnoty vrubové houževnatosti oproti výchozímu stavu je 3,5 J/cm² u stavu 6 ($\sigma_m = 525$ MPa). U výsledků je zřejmá rovněž poměrně velká hodnota relativní odchylky, která má největší hodnotu pro výsledky výchozího stavu ± 3 J/cm². Hodnoty vrubové houževnatosti jsou rovněž vyneseny do grafu (obr. 44). Zde jsou na svislé ose vyneseny hodnoty vrubových houževnatostí a na svislé ose hodnota napětí při cyklickém namáhání.

Tabulka 22 Výsledky vrubových houževnatostí jednotlivých stavů oceli 15CH2NMFA

stav	σ_m [MPa]	počet vzorků	KV ₁ [J]	KCV [J·cm ⁻²]
VS	0	8	7 ± 0,2	80,2 ± 3
1	350	2	7,1 ± 0,1	80,9 ± 1,8
2	500	2	7,2 ± 0,1	81,9 ± 0,4
6	525	2	7,5 ± 0,1	83,7 ± 0,6
4	550	2	7,2 ± 0,1	80,8 ± 0,4
7	575	2	7,4 ± 0,1	82,4 ± 1,4
3	600	2	7,1 ± 0	81,3 ± 0,4
5	625	2	7,4 ± 0,3	82,4 ± 2,6



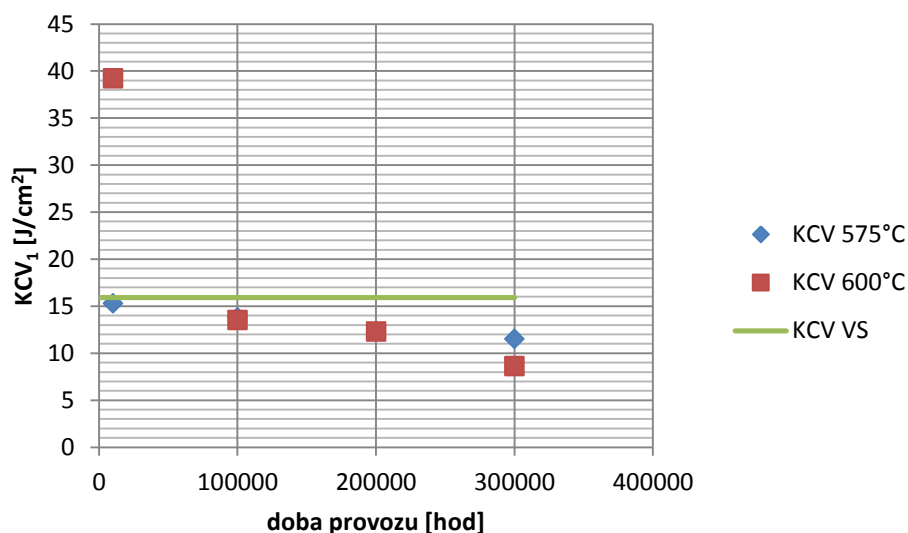
Obrázek 44 Hodnoty vrubových houževnatostí jednotlivých stavů oceli 15CH2NMFA

Porovnávané hodnoty vrubových houževnatostí oceli 16236 jsou vidět v tab. 23. Grafické znázornění je na obr. 45. Zde je vidět velké odchýlení výsledku stavu 4. Výsledky mají rovněž poměrně velikou relativní odchylku.

Tabulka 23 Hodnoty vrubové houževnatosti jednotlivých stavů oceli 16236

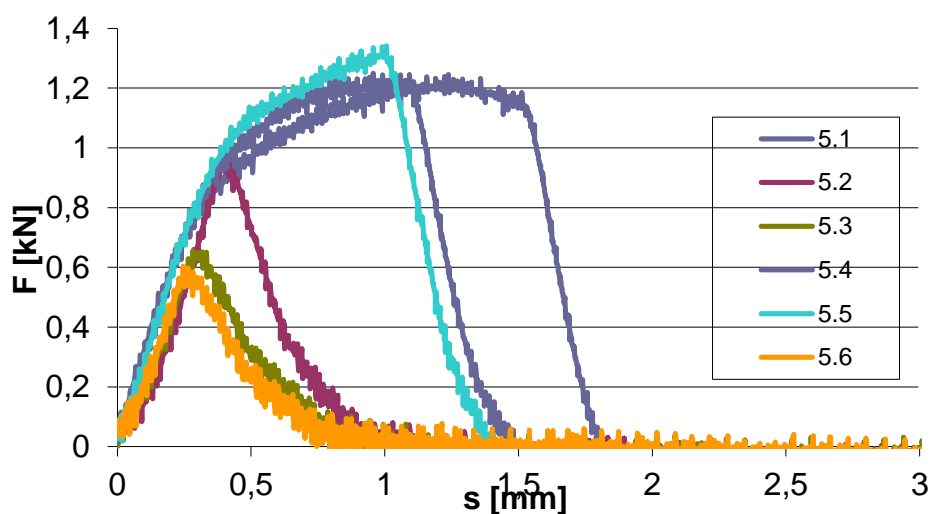
stav	doba provozu [hod]	počet vzorků	KV ₁ [J]	KCV [J·cm ⁻²]
VS	0	6	1,4 ± 0,7	15,9 ± 7,4
0	10000	6	1,4 ± 0,8	15,3 ± 8,5
4	10000	6	3,5 ± 0,2	39,2 ± 2,9

1	100000	6	1,3 ± 0,8	13,8 ± 8,5
5	100000	6	1,2 ± 0,8	13,5 ± 8,3
2	200000	6	1,1 ± 0,5	12,3 ± 5,2
6	200000	6	0,8 ± 0,3	8,6 ± 3,0
3	300000	6	1,1 ± 0,7	11,5 ± 7,8
7	300000	6	1,8 ± 0,8	20,1 ± 8,8



Obrázek 45 Hodnoty vrubové houževnatosti různých stavů oceli 16236

Tyto odchylky jsou zapříčiněny rozdílnými vlastnostmi v kořeni vrubu jednotlivých vzorků, což je vidět z instrumentovaných záznamů, viz obr. 46, kde jsou patrné předčasné křehké lomy v oblastech iniciace trhlin. Příčinou je hrubozrnná struktura ocele, jejímž následkem je kořen vrubu tvořen vždy různým podílem jednotlivých fází.



Obrázek 46 Instrumentovaný záznam zkoušek mininárazových vzorků oceli 16236

8. Závěr

Tato diplomová práce se zabývala hodnocením mechanických vlastností materiálů v různých stádiích životních cyklů s využitím zkušebních vzorků malých rozměrů. Pro hodnocení mechanických vlastností byly použity zkoušky minitahových vzorků, metoda SPT a zkoušky rázem v ohybu mininázových vzorků. Cílem této práce bylo:

- Zjištění vlivu provozní degradace materiálu na mechanických vlastnostech
- Určení případných korelačních koeficientů pro různé stavy daného materiálu

Porovnávány byly dvě Cr-Ni-Mo-V oceli v různých typech a stádiích provozní degradace.

Na oceli 15CH2NMFA byl simulován stav, kde je konstrukční součást vystavena cyklickému namáhání. Těchto stavů bylo docíleno na tyčových vzorcích, ze kterých byly následně vyřezány vzorky pro jednotlivé zkoušky. Z důvodu omezeného objemu materiálu nebylo možné vyrobit „klasické“ vzorky pro hodnocení vrubové houževnatosti o rozměrech 10x10x55.

Výsledky tahových zkoušek provedených dle ČSN EN ISO 6892-1 na různých stavech materiálu ukazují relativně neměnnou hodnotu meze pevnosti. Mez pevnosti ve výchozím stavu je 655 ± 3 MPa. Největší odchylka od hodnoty meze pevnosti ve výchozím stavu byla u stavu 22 MPa u stavu 1. Mez kluzu se se zvyšující se degradací materiálu posouvala k vyšším hodnotám napětí. To je zapříčiněno sníženou plasticitou vzorků, které byly podrobeny vyšším hladinám napěťových cyklů a tím větší mikroplastické deformaci zkoušeného objemu materiálu. Hodnota meze kluzu výchozího stavu nabývala hodnoty 536 ± 2 MPa a poměr k mezi pevnosti nabýval hodnoty 0,82 R_m . Postupně docházelo ke zvyšování hodnoty napětí smluvní meze kluzu a přiblížení k mezi pevnosti. Ve stavu 5 ($\sigma_m = 625$ MPa) byl poměr $R_{p0,2}$ ku R_m roven 0,95. Vyčerpání plasticity se lehce projevilo i na tažnosti $A_{5,65}$, která se zvyšující se degradací slabě a proměnlivě klesala.

Výsledky zkoušek tahem materiálu 15CH2NMFA, získané na minitahových vzorcích, ukázaly velmi podobný průběh mechanických vlastností jako při standardních zkouškách tahem. Korelační koeficient k_{kor} pro R_m výchozí stav nabývá hodnoty 0,939. Při zvyšující se degradací materiálu dochází ke zvyšování hodnoty korelačního koeficientu a přiblížení k hodnotě 1,000 (úplná shoda výsledků). U smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ dochází rovněž k přiblížení hodnot napětí při vzrůstající degradaci oceli. Zde je ve výchozím stavu $k_{kor} = 0,900$ a postupně dochází k téměř úplnému přiblížení k hodnotě 1,000. Tažnosti naměřené na minitahových vzorcích byly vždy větší, než tažnosti naměřené na standardních vzorcích. Korelační koeficient pro výchozí stav nabývá hodnoty 1,636 a tento rozdíl oproti standardním vzorkům zůstává v podstatě stejný pro všechny stavy materiálu.

Pro určení koeficientů $\beta_{Rp0,2}$, β_{Rm} a γ byly použity vztahy doporučené v ustanovení CEN. Hodnoty β_{Rm} mají průměrnou hodnotu $0,401 \pm 0,014$. Koeficient $\beta_{Rp0,2}$ nabývá průměrné hodnoty $0,429 \pm 0,025$. Pro koeficient γ pak $11,2 \pm 0,8$.

Výsledky mininázových zkoušek oceli 15CH2NMFA ukázaly, že oproti výchozímu stavu jsou hodnoty vrubových houževnatostí vždy vyšší, avšak není zjevný žádný průběh, který by značil závislost na velikosti degradace oceli. Vrubová houževnatost výchozího stavu má hodnotu $80,2 \pm 3,0$ a výsledná hodnota je z 8 měření. U degradovaných stavů bylo možné vyrobit pouze dva vzorky z každé série a tak je relativní odchylka menší, avšak průměrná hodnota nemusí být tak přesná.

Ocel s označením 16236 byla podrobena žihacímu procesu, jehož cílem bylo simulovat stav materiálu, který je v oceli přítomen po různých dobách provozu této oceli při 500°C.

Žíhání probíhalo při 575 °C a 600 °C. Při metalografickém pozorování byla zjištěna hrubozrnná struktura, která byla rozdílná i pro teoreticky stejně dlouhou dobu provozu.

Při tahových zkouškách provedených dle ČSN EN ISO 6892-1 byly zjištěny mechanické vlastnosti všech stavů. Výchozí stav udává hodnotu $R_m = 871 \pm 25$ MPa, $R_{p0,2} = 743 \pm 26$ MPa a $A_{5,65} = 13,0 \pm 5,5$. Již na výchozím stavu je patrný značný rozptyl hodnot, který má špatný vliv na sledování změn mechanických vlastností v různých stádiích simulované doby provozu a je prakticky nemožné z nich určit závislosti těchto změn na době provozu.

Minitahové vzorky vykazují obdobné chování jako standardní vzorky, avšak i zde se potvrzuje relativně dobrá shoda s výsledky získanými na standardních a minitahových zkušebních tělesech. Korelační koeficient vypočtený průměrem korelačních koeficientů všech stavů nabývá pro smluvní mez kluzu $R_{p0,2} = 0,973 \pm 0,028$, mez pevnosti $R_m = 0,974 \pm 0,022$ a tažnost $A = 1,418 \pm 0,154$.

Vyhodnocení koeficientů β a γ pomocí zkoušek SPT ukázalo relativně dobrou shodu pro koeficienty $\beta_{R_{p0,2}}$ a β_{R_m} . Zde nabýval průměrný koeficient β_{R_m} hodnoty $0,315 \pm 0,036$, koeficient $\beta_{R_{p0,2}} = 0,654 \pm 0,029$. U koeficientu γ , dávající do souvislosti posuv tlačného trnu s tažností, byla vypočtená průměrná hodnota $\gamma = 11,7 \pm 1,6$.

Pro hodnocení vrubové houževnatosti materiálu 16236 byly stejně jako u předchozí oceli použity mininárazové vzorky pro zkoušky rázem v ohybu. Výsledky těchto vzorků vykazovaly velké relativní odchylky u všech zkoušených stavů, což bylo způsobeno proměnlivým rozložením jednotlivých fází v kořeni vrubů mininárazových vzorků. Výsledky byly vyhotoveny z šesti vzorků od každé série a i přes značné relativní odchylky je vidět, že průměrná hodnota vrubových houževnatostí jednotlivých sérií se se stoupající dobou provozu mírně zmenšuje. Zde je však otázkou, zdali tato tendence není pouze zdánlivá vzhledem k velikostem relativních odchylek jednotlivých zkoušek. Zde by bylo nutné provést další řadu experimentů, zkoumající vliv rozložení fází v kořeni vrubu této ocele. Hodnota vrubové houževnatosti výchozího stavu má hodnotu $KCV = 15,9 \pm 7,9$ J/cm².

Jak plyne z výsledků standardních a minitahových zkoušek, minitahové vzorky dávají velmi dobrou shodu výsledků s hodnotami naměřenými pomocí standardních zkoušek tahem. Zde dochází v podstatě k přímému měření mechanických vlastností ocelí a je tak možné hodnotit velikost změn, probíhající v materiálu při jeho provozu. To se potvrdilo jak na únavově poškozené oceli 15CH2NMFA tak u oceli 16236, kde i přes nepříznivou strukturu je možné relativně přesně stanovit mechanické vlastnosti pomocí minitahových vzorků.

Zkoušky SPT se rovněž osvědčily při hodnocení degradovaných stavů. Zde je vidět, že koeficienty $\beta_{R_{p0,2}}$ a β_{R_m} si jsou velmi podobné a tím pádem by při použití těchto koeficientů pro daný materiál a daný způsob degradace materiálu mohly být použitelné pro hodnocení degradovaných stavů.

U mininárazových vzorků nebyl zjištěn vzájemný vztah mezi velikostí degradace materiálu a hodnotami vrubových houževnatostí. Proto se tato metoda příliš nehodí pro posuzování takto degradovaných typů materiálů.

V závěru je ještě nutno podotknout, že naměřené charakteristiky a závislosti platí pouze pro materiály použité v této práci a rovněž pro daný typ degradabilního procesu a korelační koeficienty nemají obecnou platnost.

9. Seznam použité literatury

- [1] KONOPIK, P. Kompatibilita výsledků hodnocení mechanických vlastností konstrukčních materiálů. Disertační práce k získání akademického titulu Ph.D., Západočeská Univerzita v Plzni, 2014.
- [2] NOVÁK, M. Hodnocení mechanických vlastností konstrukčních materiálů prostřednictvím miniaturních zkušebních těles. Diplomová práce, Západočeská Univerzita v Plzni, 2011
- [3] PTÁČEK, L a kol. Nauka o materiálu I. Brno, nakladatelství CERM, 2001, ISBN 80-7204-193-2.
- [4] PLUHAŘ J., KORRITA, J. a kol. Strojírenské materiály. SNTL Praha / ALFA bratislava, 1997, ISBN 04-212-77.
- [5] SKÁLOVÁ, J., KOVAŘÍK, R., BENEDIKT, V. Základní zkoušky kovových materiálů. 4. Vydání- dotisk, Západočeská Univerzita v Plzni, březen 2010, ISBN 978-80-7043-417-8.
- [6] PLUHAŘ, J. a kol.: Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu. SNTL Praha / ALFA Bratislava, 1987, ISBN 04-411-87.
- [7] ČSN EN ISO 6892-1: Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty. Praha: Český normalizační institut, 2017.
- [8] ČSN EN ISO 6892-2: Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za zvýšené teploty. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [9] ČSN EN ISO 6892-3: Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 3: Zkušební metoda za nízké teploty. Praha: Český normalizační institut, 2015.
- [10] Smluvní diagram R-ε. [online] [cit. 24.11.2018], dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Pracovni_diagram_Rp02.svg.
- [11] ČSN EN ISO 148-1: Kovové materiály - Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy - Část 1: Zkušební metoda. Praha: Český normalizační institut, 2017.
- [12] ČSN EN ISO 14556: Kovové materiály - Zkouška rázem v ohybu na kyvadlovém kladivu tyčí Charpy s V-vrubem - Instrumentovaná zkušební metoda. Praha: Český normalizační institut, 2017.
- [13] LUCON, E. (2016): Estimating dynamic ultimate tensile strength from instrumented Charpy data. Elsevier, Materials and Design 97, s. 437-443.
- [14] SERVER, W. L. (1978): General Yielding of Charpy V-Notch and Precracked Charpy Specimens. Journal of Engineering Materials and Technology 100 (2), s. 183-188.
- [15] DECHUN, L., GUOSHENG, W., XIULI D., YANG W. (2017): A nonlinear dynamic uniaxial strength criterion that considers the ultimate dynamic strength of concrete. International Journal of Impact Engineering 103, s. 124-137, ISSN 0734-743X.
- [16] PROCHÁZKA R. (2013): Měření mechanických vlastností konstrukčních materiálů pomocí miniaturních zkušebních vzorků. Diplomová práce, Západočeská Univerzita v Plzni, FST
- [17] LUCAS, G.E. The development of small specimen mechanical test techniques. Journal of Nuclear Materials [online]. 1983, 117, 327-339 [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.1016/0022-3115(83)90041-7. ISSN 00223115. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0022311583900417>.

- [18] BAIK, Jai-Man, J. KAMEDA a O. BUCK. Small punch test evaluation of intergranular embrittlement of an alloy steel. *Scripta Metallurgica*[online]. 1983, 17(12), 1443-1447 [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.1016/0036-9748(83)90373-3. ISSN 00369748. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0036974883903733>.
- [19] MISAWA, T., H. SUGAWARA, R. MIURA a Y. HAMAGUCHI. Small specimen fracture toughness tests of HT-9 steel irradiated with protons. *Journal of Nuclear Materials* [online]. 1985, 133-134, 313-316 [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.1016/0022-3115(85)90158-8. ISSN 00223115. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0022311585901588>.
- [20] KAMEDA, J. a O. BUCK. Evaluation of the ductile-to-brittle transition temperature shift due to temper embrittlement and neutron irradiation by means of a small-punch test. *Materials Science and Engineering* [online]. 1986, 83(1), 29-38 [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.1016/0025-5416(86)90171-0. ISSN 00255416. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0025541686901710>.
- [21] MAO, X., TAKAHASHI, H., (1987). Development of a further-miniaturized specimen of 3 mm diameter for TJZM disk (0.3 mm) small punch tests, *J. Nucl. Mater.* 150 42–52.
- [22] MISAWA, T., T. ADACHI, M. SAITO a Y. HAMAGUCHI. Small punch tests for evaluating ductile-brittle transition behavior of irradiated ferritic steels. *Journal of Nuclear Materials* [online]. 1987, 150(2), 194-202 [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.1016/0022-3115(87)90075-4. ISSN 00223115. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0022311587900754>.
- [23] KOPRIVA, Radim, Ivana ELIASOVA a Milos KYTKA. Implementation of Small Punch Testing and Automated Ball Indentation in the Process of Irradiated NPP Materials Degradation Evaluation. In: Volume 5: Student Paper Competition [online]. ASME, 2016, 2016-6-26, V005T15A043- [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.1115/ICONE24-60620. ISBN 978-0-7918-5005-3. Dostupné z: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?doi=10.1115/ICONE24-60620>.
- [24] PETZOVÁ, Jana, Martin BŘEZINA, Michal KAPUSŇÁK a Ludovít KUPČA. Application of Small Punch Testing Methods for Thermal Ageing Monitoring at Primary Circuit Components in Nuclear Power Plant. In: Volume 1A: Codes and Standards [online]. ASME, 2015, 2015-7-19, V01AT01A063- [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.1115/PVP2015-45539. ISBN 978-0-7918-5692-5. Dostupné z: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?doi=10.1115/PVP2015-45539>.
- [25] VOLÁK, J (2014). Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise. Disertační práce, Západočeská Univerzita v Plzni, FST.
- [26] HURST, Roger C., Robert J. LANCASTER, Spencer P. JEFFS a Martin R. BACHE. The contribution of small punch testing towards the development of materials for aero-engine applications. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* [online]. 2016, 86, 69-77 [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.1016/j.tafmec.2016.07.013. ISSN 01678442. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167844216301641>.
- [27] LANCASTER, R. J., H. W. ILLSLEY, G. R. DAVIES, S. P. JEFFS a G. J. BAXTER. Modelling the small punch tensile behaviour of an aerospace alloy. *Materials Science and Technology* [online]. 2016, 33(9), 1065-1073 [cit. 2018-12-06]. DOI:

10.1080/02670836.2016.1230168. ISSN 0267-0836. Dostupné z:
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02670836.2016.1230168>.

[28] FERNÁNDEZ, M., C. RODRÍGUEZ, F.J. BELZUNCE a T.E. GARCÍA. Use of small punch test to estimate the mechanical properties of sintered products and application to synchronizer hubs. *Metal Powder Report*[online]. 2017, 72(5), 355-360 [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.1016/j.mprp.2016.02.056. ISSN 00260657. Dostupné z:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0026065716001582>.

[29] WALLIN, Kim, Päivi KARJALAINEN-ROIKONEN a Pasi SUIKKANEN. Sub-sized CVN specimen conversion methodology. *Procedia Structural Integrity* [online]. 2016, 2, 3735-3742 [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.1016/j.prostr.2016.06.464. ISSN 24523216. Dostupné z:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2452321616304838>.

[30] MATOCHA, Karel, Ladislav KANDER, Ondřej DORAZIL, Kaishu GUAN a Yifen XU. The Evaluation of Actual Material Properties of Low Alloy CrMoV Steel from the Results of Small Punch Tests. *Procedia Materials Science* [online]. 2016, 12, 1-6 [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.1016/j.mspro.2016.03.001. ISSN 22118128. Dostupné z:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2211812816000109>.

[31] ADAMS, Jack, Roger C. HURST, J. Bryan BORRADAILE a Martin R. BACHE. Influence of Specimen Geometry and Strain Rate on Ductile-Brittle Transition Characterisation of Reactor Pressure Vessel Steels Using the Small Punch Technique. In: *Volume 6B: Materials and Fabrication* [online]. ASME, 2015, 2015-7-19, V06BT06A055- [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.1115/PVP2015-45373. ISBN 978-0-7918-5700-7. Dostupné z:
<http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?doi=10.1115/PVP2015-45373>.

[32] BRUCHHAUSEN, M., E. ALTSTADT, T. AUSTIN, et al. European standard on small punch testing of metallic materials. *Ubiquity Proceedings*[online]. 2018, 1(S1) [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.5334/uproc.11. ISSN 2631-5602. Dostupné z:
<https://www.ubiquityproceedings.com/article/10.5334/uproc.11/> .

[33] LANCASTER, Robert, Gareth DAVIES, Henry ILLSLEY, Spencer JEFFS a Gavin BAXTER. Structural Integrity of an Electron Beam Melted Titanium Alloy. *Materials* [online]. 2016, 9(6) [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.3390/ma9060470. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/9/6/470>.

[34] C. Rodríguez, J. García, E. Cárdenas, C. Betegón, (2009). Mechanical properties characterization of heat-affected zone using the small punch test, *Weld. J.* 88 s. 188–192.

[35] CONTRERAS, M. A., C. RODRÍGUEZ, F. J. BELZUNCE a C. BETEGÓN. Use of the small punch test to determine the ductile-to-brittle transition temperature of structural steels. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* [online]. 2008, 31(9), 727-737 [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.1111/j.1460-2695.2008.01259.x. ISSN 8756758X. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1460-2695.2008.01259.x>.

[36] BRUCHHAUSEN, M., S. HOLMSTRÖM, I. SIMONOVSKI, T. AUSTIN, J.-M. LAPETITE, S. RIPPLINGER a F. DE HAAN. Recent developments in small punch testing: Tensile properties and DBTT. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* [online]. 2016, 86, 2-10 [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.1016/j.tafmec.2016.09.012. ISSN 01678442. Dostupné z:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167844216301677>.

[37] GARCÍA, T.E., C. RODRÍGUEZ, F.J. BELZUNCE a C. SUÁREZ. Estimation of the mechanical properties of metallic materials by means of the small punch test. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2014, 582, 708-717 [cit. 2018-12-06]. DOI:

10.1016/j.jallcom.2013.08.009. ISSN 09258388. Dostupné z:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925838813018549>.

[38] MANAHAN, M.P., A.S. ARGON a O.K. HARLING. The development of a miniaturized disk bend test for the determination of postirradiation mechanical properties. *Journal of Nuclear Materials* [online]. 1981, 104, 1545-1550 [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.1016/0022-3115(82)90820-0. ISSN 00223115. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0022311582908200>.

[39] ALTSTADT, E., M. HOUSKA, I. SIMONOVSKI, M. BRUCHHAUSEN, S. HOLMSTRÖM a R. LACALLE. On the estimation of ultimate tensile stress from small punch testing. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 2018, 136, 85-93 [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2017.12.016. ISSN 00207403. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020740317331156>.

[40] FLEURY, E. a J.S. HA. Small punch tests to estimate the mechanical properties of steels for steam power plant: I. Mechanical strength. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* [online]. 1998, 75(9), 699-706 [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.1016/S0308-0161(98)00074-X. ISSN 03080161. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030801619800074X>.

[41] KUMAR, Kundan, Arun POOLEERY, K. MADHUSOODANAN, R.N. SINGH, J.K. CHAKRAVARTTY, B.K. DUTTA a R.K. SINHA. Use of Miniature Tensile Specimen for Measurement of Mechanical Properties. *Procedia Engineering* [online]. 2014, 86, 899-909 [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.11.112. ISSN 18777058. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705814020712>.

[42] R. Procházka, J. Džugan, M. Kövér, Miniature specimen tensile testing of AZ31 alloy processed by ECAP, *Archives of Materials Science and Engineering* 76/2 (2015) 134-139.

[43] DU, C., J.P.M. HOEFNAGELS, L. I. J. C. BERGERS a M. G. D. GEERS. A Uni-Axial Nano-Displacement Micro-Tensile Test of Individual Constituents from Bulk Material. *Experimental Mechanics* [online]. 2017, 57(8), 1249-1263 [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.1007/s11340-017-0299-6. ISSN 0014-4851. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11340-017-0299-6>.

[44] DU, C., F. MARESCA, M.G.D. GEERS a J.P.M. HOEFNAGELS. Ferrite slip system activation investigated by uniaxial micro-tensile tests and simulations. *Acta Materialia* [online]. 2018, 146, 314-327 [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.1016/j.actamat.2017.12.054. ISSN 13596454. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359645418300107>.

[45] KONOPIK, P, J DŽUGAN, T BUCKI, S RZEPA, M RUND a R PROCHÁZKA. Correlation between standard Charpy and sub-size Charpy test results of selected steels in upper shelf region. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2017, 179 [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.1088/1757-899X/179/1/012039. ISSN 1757-8981. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/1757-899X/179/i=1/a=012039?key=crossref.e53f4b54d8fd42202f68d9a02223b003>.

[46] KRAVCHUK, A. V., E. O. KONDRYAKOV, O. V. PANASENKO a V. V. KHARCHENKO. Determination of the Temperature Dependences of the Fracture Energy Components of Specimens of Various Types in Impact Bending Tests. *Strength of Materials* [online]. 2017, 49(6), 809-817 [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.1007/s11223-018-9926-4. ISSN 0039-2316. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11223-018-9926-4>.

- [47] WALLIN, Kim, Päivi KARJALAINEN-ROIKONEN a Pasi SUIKKANEN. Sub-sized CVN specimen conversion methodology. *Procedia Structural Integrity* [online]. 2016, 2, 3735-3742 [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.1016/j.prostr.2016.06.464. ISSN 24523216. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2452321616304838>.
- [48] ZHANG, X.P. a Y.W. SHI. Fracture toughness of Charpy-size compound specimens and its application in engineering. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* [online]. 1994, 57(1), 91-98 [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.1016/0308-0161(94)90102-3. ISSN 03080161. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0308016194901023>.
- [49] Konopik P, Dzugan J and Rund M 2015 METAL 2015 – 24th Int. Conf. on Metallurgy and Mat. (Brno) Determination of fracture toughness in the upper shelf region using small sample test techniques (Ostrava: TANGER Ltd.) s. 710-15.
- [50] RZEPA, S, T BUCKI, P KONOPÍK, J DŽUGAN, M RUND a R PROCHÁZKA. Influence of specimen dimensions on ductile-to-brittle transition temperature in Charpy impact test. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2017, 179 [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.1088/1757-899X/179/1/012063. ISSN 1757-8981. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/1757-899X/179/i=1/a=012063?key=crossref.6835992366de8b40e76d0e2966a51e43>.
- [51] BRUCHHAUSEN, M., S. HOLMSTRÖM, J.-M. LAPETITE a S. RIPPLINGER. On the determination of the ductile to brittle transition temperature from small punch tests on Grade 91 ferritic-martensitic steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* [online]. 2017, 155, 27-34 [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2017.06.008. ISSN 03080161. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0308016115301162>.
- [52] ALTSTADT, E., H.E. GE, V. KUKSENKO, et al. Critical evaluation of the small punch test as a screening procedure for mechanical properties. *Journal of Nuclear Materials* [online]. 2016, 472, 186-195 [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2015.07.029. ISSN 00223115. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S002231151530115X>.
- [53] ALTSTADT, E., M. SERRANO, M. HOUSKA a A. GARCÍA-JUNCEDA. Effect of anisotropic microstructure of a 12Cr-ODS steel on the fracture behaviour in the small punch test. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2016, 654, 309-316 [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.1016/j.msea.2015.12.055. ISSN 09215093. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509315307504>.
- [54] Obr. 3 MAREČEK, J. (2011). Energetické porovnání dynamického a statického porušení materiálu. VÚT v Brně, bakalářská práce.
- [55] Obr. 2 Pracovní uspořádání zkoušky rázem v ohybu, [online][cit. 27.11.2018] dostupné z: http://xyz12345.wz.cz/tmr/zkousky_mech.html.
- [56] Obr. 6 a) Joffeho diagram, b) Joffeho diagram pro polykrystalické materiály, [online][cit. 27.12.2018] dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/Zk_sireni_trhlin%2009_10.pdf.
- [57] MENTL V., Janda R.: Lomová houževnatost ocele ČSN 416 236 stanovená na tělesech 150 a 200 mm, Výzkumná zpráva TIZ 1292, ŠKODA – ÚVZÚ, Plzeň, 1984.
- [58] M. Richardson, S. Connolly, M. Gorley, B. Wynne, and E. Surrey, "Influence of Surface Finish on Small Punch Testing of 9Cr Eurofer-97 Steel," *Journal of Testing and Evaluation* 48 (in press). <https://doi.org/10.1520/JTE20180619>.
- [59] BRUCHHAUSEN, M., LAPETITE, J.M., RIPPLINGER, S. Small punch tensile/fracture test data and 3D specimen surface data on Grade 91 ferritic/martensitic steel

from cryogenic to room temperature. September 2016. Data in Brief 9(C).
DOI: 10.1016/j.dib.2016.08.061.

10. Seznam obrázků

Obrázek 1 Schéma deformace vzorku jednoosým tahem [5].....	4
Obrázek 2 Smluvní diagram R-ε [10]	6
Obrázek 3 Schéma zkoušky rázem v ohybu [54].....	8
Obrázek 4 Pracovní uspořádání zkoušky rázem v ohybu [55].....	9
Obrázek 5 Vidalova křivka [5].....	10
Obrázek 6 a) Joffeho diagram, b) Joffeho diagram pro polykrystalické materiály [56].....	10
Obrázek 7 Vliv tvaru vrubu na vrubovou houževnatost [5].....	11
Obrázek 8 Schématické znázornění typů křivek [12]	12
Obrázek 9 Schéma SP testu [39].....	13
Obrázek 10 Průběh SP testu [33]	14
Obrázek 11 Vyhodnocení Fe pro výpočet Rp0,2 [22]	14
Obrázek 12 Ukázka z měření pomocí kamery GOM Aramis 3D [16].....	16
Obrázek 13 Instrumentovaný záznam pro různé typy těles [16].....	17
Obrázek 14 Snímek struktury oceli 16236 stav VS, zvětšeno 500x, leptáno Nitalem.....	21
Obrázek 15 Snímek struktury oceli 16236 stav 7, zvětšeno 500x, leptáno Nitalem.....	21
Obrázek 16 Snímek struktury oceli 15CH2NMFA, zvětšeno 50x, leptáno Nitalem.....	22
Obrázek 17 Snímek struktury oceli 15CH2NMFA, zvětšeno 1000x, leptáno Nitalem	23
Obrázek 18 Graf závislosti velikosti největšího výkmitu napětí na počtu cyklů.....	24
Obrázek 19 a) Univerzální trhací stroj Zwick Roell Z250; b) mechanické extensometr Zwick Roell MultXtens.PAC2; c) optický extensometr LaserXtens HP	26
Obrázek 20 Rozložený přípravek pro SPT zkoušky	26
Obrázek 21 Rázové kladivo Z/R RKP 450	27
Obrázek 22 Magnetorezonanční pulzátor Z/R 50 HFP5100	28
Obrázek 23 Ukázka rozřezu plochých těles, z nichž byly vyrobeny dlouhé tyče (materiál 15CH2NMFA)	28
Obrázek 24 Snímky pořízené termokamerou při měření teploty vzorku při nakmitávání. Snímky jdou za sebou s rozestupem 40 s.	29
Obrázek 25 a) Ukázka rozmístění vzorků v dlouhé tyči oceli 15CH2NMFA; b) ukázka rozřezu výchozího stavu oceli 15CH2NMFA	30
Obrázek 26 Ukázka rozložení malých vzorků v CT tělese z materiálu 16236	30
Obrázek 27 Výkres vzorku pro zkoušky tahem dle normy ČSN EN ISO 6892-1	31
Obrázek 28 Výkres vzorku pro zkoušky SPT	31

Obrázek 29 Výkres vzorku pro minitahové zkoušky	32
Obrázek 30 a) Klasický vzorek pro zkoušky rázem v ohybu; b) malý vzorek pro zkoušky rázem v ohybu	32
Obrázek 31 Pracovní uspořádání zkoušky tahem dle ČSN EN ISO 6892-1	33
Obrázek 32 Pracovní uspořádání zkoušky tahem minitahových vzorků	36
Obrázek 33 Záznam z optického extensometru Z/R LaserXtens HP s patrnými značkami na vzorku	36
Obrázek 34 Pracovní uspořádání SPT zkoušek	40
Obrázek 35 Hodnoty smluvní meze kluzu a meze pevnosti naměřené na standardních a minitahových vzorcích	44
Obrázek 36 Hodnoty tažností naměřené na standardních a minitahových vzorcích	44
Obrázek 37 Grafické znázornění velikosti rozdílu a) smluvní meze kluzu, b) meze pevnosti, c) tažnosti, naměřené na standardních a minitahových vzorcích oceli 15CH2NMFA	46
Obrázek 38 Koeficient $\beta_{Rp0,2}$ a β_{Rm} oceli 15CH2NMFA	47
Obrázek 39 Smluvní meze kluzu naměřené na standardních a minitahových vzorcích z oceli 16236	48
Obrázek 40 Meze pevnosti naměřené na standardních a minitahových vzorcích z oceli 16236	48
Obrázek 41 Tažnosti naměřené na standardních a minitahových vzorcích z oceli 16236	49
Obrázek 42 Grafické znázornění velikosti rozdílu a) smluvní meze kluzu, b) meze pevnosti, c) tažnosti, naměřené na standardních a minitahových vzorcích oceli 16236	50
Obrázek 43 Koeficient $\beta_{Rp0,2}$ a β_{Rm} oceli 16236	51
Obrázek 44 Hodnoty vrubových houževnatostí jednotlivých stavů oceli 15CH2NMFA	52
Obrázek 45 Hodnoty vrubové houževnatosti různých stavů oceli 16236	53
Obrázek 46 Instrumentovaný záznam zkoušek mininárazových vzorků oceli 16236	53

11. Seznam tabulek

Tabulka 1 Ukázka výsledků konstanty pro zjištění R_m [26]	15
Tabulka 2 Tabulkové chemické složení ocele 16 236	19
Tabulka 3 Chemické složení oceli 15 236 ve výchozím stavu	19
Tabulka 4 Chemické složení oceli 15 236 ve stavu 7 (viz níže)	19
Tabulka 5 Mechanické vlastnosti ocele 16 236	20
Tabulka 6 Přehled simulovaných stavů	20
Tabulka 7 Tabulkové chemické složení ocele 15CH2NMFA	23
Tabulka 8 Chemické složení plochých tyčí z oceli 15CH2NMFA, označení A23/5, výsledné hodnoty z pěti měření	23
Tabulka 9 Reálné chemické složení několika taveb oceli 15CH2NMFA	24

Tabulka 10 Přehled degradovaných stavů materiálu 15CH2NMFA	24
Tabulka 11 Výsledky tahových zkoušek oceli 15CH2NMFA dle ČSN EN ISO 6892-1	33
Tabulka 12 Výsledky tahových zkoušek oceli 16 236 dle normy ČSN EN ISO 6892-1.....	34
Tabulka 13 Výsledky tahových zkoušek oceli 16 236 při 500 °C	35
Tabulka 14 Výsledky zkoušek minitahových vzorků oceli 15CH2NMFA	36
Tabulka 15 Výsledky zkoušek minitahových vzorků oceli 16236.....	38
Tabulka 16 Výsledky zkoušek SPT z materiálu 15CH2NMFA	40
Tabulka 17 Výsledky zkoušek SPT z materiálu 16236.....	41
Tabulka 18 Porovnání mechanických vlastností získaných na standardních a minitahových vzorcích oceli 15CH2NMFA	43
Tabulka 19 Výsledky zkoušek SPT	46
Tabulka 20 Porovnání mechanických vlastností naměřených na standardních a minitahových vzorcích z oceli 16236.....	47
Tabulka 21 Výsledky zkoušek SPT materiálu 16236	51
Tabulka 22 Výsledky vrubových houževnatostí jednotlivých stavů oceli 15CH2NMFA.....	52
Tabulka 23 Hodnoty vrubové houževnatosti jednotlivých stavů oceli 16236	52