

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: **Doktorský studijní program P 2301**

Studijní obor: **Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie - 3911V016**

DISERTAČNÍ PRÁCE

k získání akademického titulu doktor

APLIKACE MINIATURIZOVANÝCH ZKUŠEBNÍCH TĚLES PŘI HODNOCENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ A ODOLNOSTI PROTI KŘEHKÉMU LOMU

Autor: **Ing. Eva Chvostová**

Školitel: **doc. Ing. Ján Džugan Ph.D**

Plzeň, 2016

Poděkování

Touto cestou bych chtěla poděkovat všem, kteří mi umožnili na této práci pracovat a podporovali mě. Jedná se především o mého školitele doc. Ing. Jána Džugana, Ph.D., za profesionální vedení mé práce a mého školitele specialistu prof. Ing. Václava Mentla, CSc. za rady a věcné připomínky. Děkuji společnostem Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o. a COMTES FHT a.s., které mně umožnily provést potřebná měření ve svých laboratořích. A v neposlední řadě můj dík patří mé rodině, která mě od začátku plně podporovala a motivovala tuto práci dokončit.

Anotace

Předkládaná práce se zabývá dalším rozvojem použití miniaturizovaných vzorků pro posouzení mechanických vlastností materiálu. Tyto testy jsou používány v případě malého objemu experimentálního materiálu, jako je například vývoj nových materiálů, hodnocení materiálů vyrobených extrémní plastickou deformací, či určení míry degradace provozovaného zařízení za účelem odhadu zbytkové životnosti. Metoda semi-destruktivních odběrů spočívá v šetrném odebrání minimálního množství materiálu bez ovlivnění odebíraného materiálu a bez dalších nutných oprav funkčního komponentu. Penetrační zkouška (SPT) je používána k vyhodnocení vlastností pro tyto aplikace, ale vzhledem k její hlavní nevýhodě - nutnosti definované korelace mezi SPT zkouškami a reálnými testy pro všechny uvažované aplikace, jsou vyvíjeny metody alternativní. Znalost korelace může být v mnoha případech obtížná nebo přímo nemožná, proto jsou nově vyvíjené metodiky, které používají miniaturizované standardní zkušební vzorky. Předložená práce porovnává výsledky získané s použitím metod SPT a aplikovaných / vyvinutých miniaturních zkušebních těles s výsledky standardních vzorků v oblasti zkoušek tahem, zkoušek rázem v ohybu, vysoko cyklové únavy a zkoušek tečení. Použité experimentální materiály pro vývoj / ověřování metod jsou oceli používané v energetice. Některé z nich jsou zkoumány ve stavu po provozu. Výsledky testů SPT neposkytly spolehlivé výstupy, zatímco použití miniaturizovaných vzorků přineslo velmi dobré výsledky ve srovnání s výsledky standardních zkoušek a ukázalo další směry vývoje v této oblasti.

Klíčová slova: Zkouška tahem, zkouška rázem v ohybu, creep, Small Puch Test (SPT), Mikro-tahové testy (MT-T), mechanické vlastnosti

Annotation

The presented thesis deals with further development of small sized specimens techniques for mechanical properties assessment. These tests are being applied for cases when there is shortage of the experimental materials (new materials development, severe plastic deformation processes, residual service life assessment of in service components). These applications require careful experimental material removal for reliable properties determination without any negative effect on the material extracted or original component. Small punch test technique (SPT) is widely used for these applications, but due to its main drawback – necessity of known correlation between the SPT tests and real tests for all considered applications that can be in many cases difficult or directly impossible, miniaturized standard sized specimen techniques are developed recently. The presented thesis investigate results obtained with the use of SPT and applied/developed mini-sized standard specimens in the field of tensile tests, Charpy impact tests, high cycle fatigue and creep tests. The experimental materials used for the development/verification of methods are steels used in power industry. Some of them are investigated also in state after the service. Results of SPT tests did not provide reliable outputs, however the miniaturized specimens yielded very good results in comparison with standard sized specimens and pointed out further development directions in the field.

Keywords: Tensile test, Impact bend test, creep, Small Puch Test (SPT), Micro-Tensile Tests (MT-T), mechanical properties

Obsah:

1. ÚVOD	8
2. ZKOUŠKA TAHEM.....	10
2.1. Zkušební tyče.....	10
2.1.1. Poměrná zkušební tělesa	10
2.1.2. Nepoměrná zkušební tělesa	10
2.2. Základní typy tahových diagramů	10
2.3. Vyhodnocení základních charakteristik	11
2.3.1. Mez pevnosti	12
2.3.2. Mez kluzu	12
2.3.3. Tažnost	13
2.3.4. Kontrakce	13
3. ZKOUŠKA RÁZEM V OHYBU METODOU CHARPY	14
3.1. Podstata zkoušky.....	14
3.2. Vyhodnocení přechodové teploty.....	16
3.3. Instrumentovaná zkušební metoda	18
4. ZKOUŠKY ÚNAVY	20
4.1. Zkušební stroje a vzorky pro únavové zkoušky	21
4.2. Parametry cyklického zatěžování	22
4.3. Vyhodnocování únavového chování	23
4.4. Wöhlerova křivka	23
4.5. Staircase Fatigue Test.....	25
4.6. Manson-Coffinova křivka	26
5. ZKOUŠKY TEČENÍ.....	27
5.1. Křivka tečení	29
5.2. Dlouhodobá pevnost materiálu	30
5.3. Změny ve struktuře při tečení	31
5.4. Charakteristiky creepové životnosti.....	34
5.5. Zkušební zařízení a podmínky zkoušení.....	34
5.6. Stanovení rozsahu zkoušení	37
5.7. Stanovení extrapolačního postupu	39
6. ZKOUŠKY MINIATURNÍCH TĚLES	40
6.1. Odběr materiálu.....	40
6.2. Small Punch Test.....	45
6.2.1. Vznik metody Small Punch Testu	45
6.2.2. Výhody a nevýhody SPT.....	46
6.2.3. Princip a postup zkoušení.....	47
6.2.4. Vyhodnocení zkoušky SPT	49
6.2.5. Vyhodnocení lomové energie při SPT	52
6.2.6. Vyhodnocení efektivní lomové deformace	52

6.2.7.	Stanovení meze pevnosti a meze kluzu na základě výsledků SPT.....	54
6.2.8.	Určení přechodové teploty na základě výsledků SPT.....	56
6.3.	Zkoušky tečení pomocí SPT.....	58
7.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	60
7.1.	Ocel ČSN 415128.....	60
7.2.	Ocel na odlitky 42 2747.....	62
7.3.	Ocel 15CH2NMFA.....	68
7.4.	Ocel T552.....	69
7.5.	Svarový spoj - návar.....	71
8.	VYHODNOCENÍ TAHOVÝCH VLASTNOSTÍ.....	76
8.1.	Standardní zkoušky tahem.....	76
8.2.	Zkoušky SPT.....	77
8.3.	Mikro tahové zkoušky.....	78
8.4.	Experimentální výsledky materiálu 15 128.....	79
8.5.	Experimentální výsledky návaru.....	83
8.6.	Diskuze výsledků zkoušky tahem.....	86
9.	ZKOUŠKA RÁZEM V OHYBU.....	87
9.1.	Materiál 15 128 -parovod po provozu.....	88
9.2.	Ocel na odlitky 42 2747 po provozu.....	92
9.3.	Svarový spoj.....	95
9.4.	Diskuze výsledků zkoušek rázem v ohybu pro stanovení tranzitní teploty FATT.....	103
10.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST - ÚNAVA.....	104
10.1.	Tvar zkušebního vzorku.....	106
	Stanovení koncentrace napětí u vzorku 2.....	108
10.2.	Provedení zkoušek únavy.....	109
10.3.	Výsledky zkoušek únavy materiál u T552.....	111
10.4.	Výsledky zkoušek únavy materiálu 15CH2NMFA.....	121
10.5.	Výsledky zkoušek únavy materiálu 16 236+návaru.....	125
10.6.	Ověření velikostního faktoru.....	127
10.7.	Diskuze výsledků zkoušek únavy.....	132
11.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST - CREEP.....	133
11.1.	Metodika zkoušek tečení.....	133
11.2.	Provedení zkoušek tečení.....	136
11.3.	Materiál č. 1 parovod.....	140
11.4.	Materiál č. 2 vnitřní těleso skříně.....	145
11.5.	Materiál č. 3 svarový spoj.....	148
11.6.	Diskuze výsledků zkoušek tečení.....	151
12.	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	153
13.	ZÁVĚR.....	156
14.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	159
15.	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	163
16.	SEZNAM TABULEK.....	167
17.	SEZNAM PUBLIKACÍ.....	169

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

BM	Base material (základní materiál)	
ECCC	European Creep Collaborative Committee	
FATT₅₀	Fracture Appearance Transition Temperature (Přechodová teplota vyhodnocená na základě 50 % podílu křehkého (štěpného) a houževnatého (tvárného) lomu)	
MKP	Metoda konečných prvků	
M-TT	Micro-Tensile Tests (Mikro-tahové zkoušky)	
SFT	Small Fatigue Test	
SPT	Small Punch Test	
SK	Svarový kov	
TOO	Tepelné ovlivněná oblast	
SPT	Small Punch Test	
A	Tažnost	[%]
Ag	Plastické prodloužení při max. zatížení měřené průtahoměrem	[%]
BF	Podíl křehkého lomu	[%]
C	Materiálová konstanta	[-]
d₀	Počáteční průměr zkušební tyče	[mm]
E	Youngův modul pružnosti v tahu	[MPa]
F	Síla	[N]
F_a	Velikost síly při zastavení trhliny	[kN]
F_e	Síla charakterizující přechod z lineárního stavu do stádia spojovaného s rozvojem plastické deformace přes tloušťku disku při SPT	[N]
F_{gy}	Síla na mezi makroplastických deformací	[kN]
F_{iu}	Velikost síly při inicializaci trhliny	[kN]
F_m	Maximální síla zaznamenaná během testu SPT	[N]
F_{max}	Maximální síla dosažená při zkoušce tahem	[N]
F_Q	Síla měřená při zkouškách lomové houževnatosti definovaná jako průsečík 5% sečny nebo max. síla při prasknutí zkušebního tělesa	[kN]
G	Rychlost uvolňování energie, hnací síla trhliny	[N/m]
H	Výška zkušebního Charpy tělesa	[mm]
h₀	Počáteční tloušťka SPT disku	[mm]
h_f	Tloušťka disku po zkoušce SPT v těsné blízkosti trhliny (nejušší předpokládané místo po zkoušce SPT)	[mm]
KCU	Vrubová houževnatost měřená na Charpy tělese s U-vrubem	[J/cm ²]
KCV	Vrubová houževnatost měřená na Charpy tělese s V-vrubem	[J/cm ²]

K_{CH}	Experimentální konstanta pro vyhodnocení BF ze záznamu při zkouškách rázem v ohybu na Charpy tělesech	[-]
KV (KU)	Nárazová práce-těleso s V-rubem (U-vrubem)	[J]
L₀	Počáteční měřená délka	[mm]
L_c	Zkoušená délka	[mm]
L_e	Počáteční měřená délka průtahoměru	[mm]
L_t	Celková délka zkušební tyče	[mm]
L_u	Konečná měřená délka	[mm]
N_f	Počet cyklů do porušení	[-]
P_{LM}	Parametr Larson - Miller	[-]
R	Asymetrie únavového cyklu	[-]
R_e, R_p	Výrazná/smluvní mez kluzu	[MPa]
R_{eH}	Výrazná horní mez kluzu	[MPa]
R_{eL}	Výrazná dolní mez kluzu	[MPa]
R_m	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
R_{mT}	Mez pevnosti při tečení	[MPa]
R_T	Mez tečení	[MPa]
R_{p0,2}	Smluvní mez kluzu při plastické deformaci 0,2%	[MPa]
S₀	Počáteční průřez zkušební tyče při zkoušce tahem	[mm ²]
S_{0(CH)}	Počáteční průřez pod vrubem Charpy tělesa	[mm ²]
S_f	Velikost lomové plochy	[mm ²]
S_u	Konečná nejmenší plocha příčného průřezu	[mm ²]
T_{SP}	Tranzitní teplota získaná ze SPT	[K]
U	Elastická deformační energie tělesa	[J]
u_f	Deformace odpovídající porušení disku při SPT	[N]
u_m	Deformace při maximální síle při SPT	[N]
v	Posuv zatěžující síly	[mm]
V	Objemová jednotka materiálu	[m ³]
Z	Kontrakce	[%]
α_{SPT}	Korelační koeficient pro SPT	[-]
ΔL	Prodloužení zkušební tyče	[mm]
Δt	Teplotní posun	[°C]
ε	Poměrná deformace	[%]
σ	Napětí	[MPa]
σ_a	Amplituda napětí	[MPa]
σ_c	Mez únavy	[MPa]
σ	Napětí	[MPa]
σ_{max}	Maximální hodnota napětí	[MPa]
σ_{min}	Minimální hodnota napětí	[MPa]
σ_m	Střední napětí cyklu	[MPa]
σ_y	Efektivní mez kluzu	[MPa]
τ_z	Zbytková životnost	[h]

1. Úvod

Problematika měření a hodnocení mechanických charakteristik materiálů je velmi rozsáhlá [1] a předkládaná disertační práce se zabývá vyhodnocováním materiálových charakteristik pomocí miniaturních vzorků a porovnáním s výsledky měření na standardních vzorcích. Využití těchto metod je poměrně rozsáhlé, např. při odhadech zbytkové životnosti strojních zařízení. V případech, kdy konstrukce pracuje v podmínkách, které způsobují degradaci, zhoršení, pokles mechanických vlastností (v důsledku působení vysoké teploty, cyklického zatěžování, koroze, radiace apod.), je nutno tyto vlivy brát v úvahu již ve stádiu dimenzování příslušných jednotlivých komponent i zařízení jako celku. Konstrukce v takových případech bývají dimenzovány na omezenou životnost, např. tepelně-energetická zařízení na dobu provozu dvaceti nebo třiceti let. Častou úlohou je stanovení zbytkové životnosti konstrukce v případech, kdy plánovaná, výpočtová doba životnosti se blíží ke konci a uživatel se ptá, zda, popř. za jakých podmínek může zařízení provozovat i nadále.

V podobných praktických případech je obvykle obtížné stanovit stupeň degradace materiálových vlastností vlivem provozních podmínek, např. proto, že nejsou obvykle původní materiálové mechanické vlastnosti dostatečně přesně známy. Stejně tak není jednoduché pokles mechanických vlastností určit klasickými destruktivními zkušebními metodami, protože není možné z provozovaných součástí odebrat dostatečné množství reprezentativního materiálu pro výrobu klasických zkušebních těles. Při provozu energetických zařízení je řada kritických součástí vystavena napětíovému a teplotnímu působení. V důsledku toho dochází, i v součástech poměrně jednoduchých tvarů, k nerovnoměrnému rozložení degradace vlastností. Při rozhodování o dalším provozu takových součástí a zařízení je znalost lokálních vlastností základní podmínkou.

Pro stanovení aktuálních vlastností materiálů dlouhodobě provozovaných zařízení resp. stanovení výchozích vlastností materiálů konstrukcí a zařízení uváděných do provozu, které zohledňují všechny technologické operace při jejich výrobě, je nezbytné minimalizovat množství potřebného zkušebního materiálu. Polotovary pro výrobu zkušebních vzorků je nejvhodnější odebírat z kritických míst součástí, pokud možno bez porušení její integrity a tedy nutnosti následných oprav při zachování jeho reprezentativnosti. Tento požadavek vedl:

1. K vývoji zařízení a technologických postupů, která umožňují odběr zkušebního materiálu z vnějšího a/nebo vnitřního povrchu součástí při zachování celistvosti posuzované součásti bez nutnosti následných oprav.
2. K vývoji a zavedení zkušebních metod využívajících pro stanovení požadovaných konvenčních a/nebo nekonvenčních mechanických vlastností miniaturizovaných zkušebních těles, která je možno připravit z takto odebraného zkušebního materiálu.

Proto je v poslední době věnována pozornost možnosti „semi-destruktivních“ odběrů a následně zkouškám mechanických vlastností pomocí metod využívající miniaturních vzorků, např. typu Small Punch Test [2]. Intenzivní zájem je věnován rozvoji zkoušek mechanických vlastností s využitím miniaturizovaných standardizovaných vzorků, které mají velkou výhodu oproti jiným používaným metodám - stejný režim zatěžování jako u klasických zkušebních vzorků. Stejný režim zatížení totiž významně snižuje nebo zcela odstraní složitost převodu výsledků z jiného režimu zatěžování, jako je tomu např. v případě SPT. Také při vývoji nových materiálů se často pracuje s velmi malým množstvím materiálu, a proto se zde zkoušky na miniaturních tělesech s výhodou uplatňují (např. zkoušení vzorku po termofyzikální simulaci či při hodnocení objemových materiálů s nanostrukturou vyrobených metodami velké plastické deformace, např. ECAP, HPT, CONFORM, [3]). V případě Mikro-Tahového Testu MT-T [4] lze takové těleso

s výhodou použít např. pro zkoušení tenkostěnných trubek, pokud potřebujeme měřit tahové vlastnosti v jiném směru než v axiálním (pro axiální směr lze využít standardní tahovou zkoušku).

V předkládané práci jsou porovnávány naměřené mechanické charakteristiky materiálů (na standardizovaných tělesech) s výsledky z nestandardních zkoušek miniaturních těles, které využívají malého objemu experimentálního materiálu. Malým objemem materiálu je v tomto případě myšleno množství materiálu, které je možno odebrat (např. z provozovaných komponent) pomocí odběrových zařízení jako jsou SSamTM-2 [5] nebo zařízení EDSE (The Electric Discharge Sampling Equipment) [6][7]. Tato zařízení budou popsána v kapitole 6.1. V rámci zkoušek miniaturních těles bude pozornost věnována metodě Small Punch Test (SPT) a použití mini vzorků u zkoušek tahem, zkoušek rázem v ohybu, zkoušek tečení a zkoušek únavy. Účelem teoretické části je popsat tyto čtyři zkoušky s důrazem na metodiku měření a vyhodnocení hodnot, které se budou vůči sobě korelovat. V další části práce je popsána metodika odběru materiálu „semidestruktivní“ metodou a zkušební metoda Small Punch Test (viz kapitola 6.1). Bude také detailně popsána zkouška SPT prováděná dle dokumentu CWA 15627 [8]. Ačkoli je SPT stále diskutovaná a používaná metoda, neustálá nutnost přepočtu naměřených hodnot na standardní charakteristiky pomocí korelací je její velká nevýhoda, neboť to obnáší nutnost vytvoření databáze pro zkoumané typy materiálů. Tato nevýhoda by byla částečně odstraněna, pokud by byly výsledky z miniaturních těles použitelné univerzálněji.

Toho je možno dosáhnout, pokud se použijí či navrhnou testy využívající miniaturní tělesa pro vyhodnocení výše zmíněných charakteristik, které jsou svým způsobem zatěžování shodné se standardními zkouškami. U takových testů se dá předpokládat, že případné korelace na standardní materiálové charakteristiky budou více spolehlivé nebo korelace nebudou vůbec potřeba. V rámci této práce se jedná o zkoušky tahem na mikro-tahovém vzorku, o zkoušky rázem v ohybu na mini-Charpy tělesech a zkoušky tečení a zkoušky únavy na nově navržené geometrii tělesa vycházejícího z velikosti odebraného vzorku materiálu pomocí semi-destruktivního odběru. Experimentální část se zabývá měřením, vyhodnocením a porovnáním materiálových charakteristik na vybraných zkoumaných materiálech používaných v energetice pomocí standardních těles, dále jsou naměřeny charakteristiky metodou SPT a nakonec pomocí mini vzorků. Diskutovanými standardními zkouškami jsou zkoušky tahem, zkoušky rázem v ohybu, zkoušky únavy a zkoušky tečení. U těchto zkoušek jsou vyhodnocovány tyto typické materiálové charakteristiky: R_m , $R_{p0,2}$, A , Z , KV , KCV , $FATT_{50}$, R_m , σ_c . Cílem disertační práce je ověření/navržení metodik pro stanovení vybraných materiálových charakteristik pomocí nestandardních zkoušek miniaturizovaných těles a to nejen metodou Small Punch Test, ale především za použití mini vzorků, které se mohou vyrobit z minimálního objemu odebraného materiálu semi-destruktivním odběrem.

Cíle disertační práce jsou následující:

- Ověřit metodiku SPT pro přepočet výsledků zkoušky tahem, vyzkoušet vztah, který se zabývá korelací SPT hodnot na zkoušky tahem (vyjma tažnosti a kontrakce, které se ze SPT nevyhodnocují), ověřit možnost použití mikro vzorků pro zkoušku tahem a porovnat získané výsledky
- Ověřit metodiku přepočtu přechodové teploty $FATT_{50}$ naměřené na mini Charpy vzorcích na přechodovou teplotu získanou na standardních zkušebních tělesech
- Ověřit metodiku SFT, návrh geometrie zkušebního mini vzorku v oblasti zkoušek únavy a verifikace výsledků na nově navržených miniaturních vzorcích
- Ověřit metodiku SPT a navrhnout mini vzorek v oblasti zkoušek tečení a verifikace výsledků na mini vzorcích s výsledky ze standardních vzorků.

2. Zkouška tahem

Zkouška tahem je jedna ze základních a nejdůležitějších zkoušek. Její historie sahá až do 15. století, kdy Leonardo da Vinci zkoušel pevnost konopných lan jednoduchou tahovou zkouškou. První zkušební tahový stroj byl postaven roku 1729 a systematicky začalo zkoušení pevnosti od poloviny 19. století [9].

Význam této zkoušky spočívá např. v:

- Hodnocení kvality materiálu
- Technicko-dodací podmínky
- Analýza havárií
- Pevnostní výpočty
- Souhrn základních mechanických vlastností – v materiálových listech a databázích

Provedení zkoušky se řídí normou ČSN EN ISO 6892-1 [11] platnou od února 2010. Zkouška tahem spočívá v deformaci zkušební tělesa tahovým zatížením, obvykle do lomu, za účelem stanovení pevnostních a deformačních charakteristik. Napěťová a deformační rychlost je stanovena normou.

2.1. Zkušební tyče

Tvar a rozměry zkušebních tyčí závisí na tvaru a rozměrech kovových výrobků, pro které jsou určovány mechanické vlastnosti. Zkušební tyč je obvykle připravena obráběním vzorku odebraného z výrobku; vzorky o stálém příčném průřezu (profily, dráty, tyče) mohou být podrobeny zkoušce bez obrobení. Příčný průřez zkušebních těles může být kruhový, čtvercový, obdélníkový, prstencový nebo jiného tvaru. Obvyklý rozměr standardního kruhového zkušební vzorku je průměr 6, resp. 8, resp. 10mm s upínací hlavou M10, resp. M12, resp. M16.

2.1.1. Poměrná zkušební tělesa

Upřednostňovaná zkušební tělesa mají přímý vztah mezi počáteční měřenou délkou a počátečním průřezem vyjádřený rovnicí (1). Taková to tělesa se nazývají poměrná zkušební tělesa. Mezinárodně přijatá norma uvádí součinitel proporcionality rovný 5,65.

$$L_0 = k_p \cdot \sqrt{S_0} \quad (1)$$

2.1.2. Nepoměrná zkušební tělesa

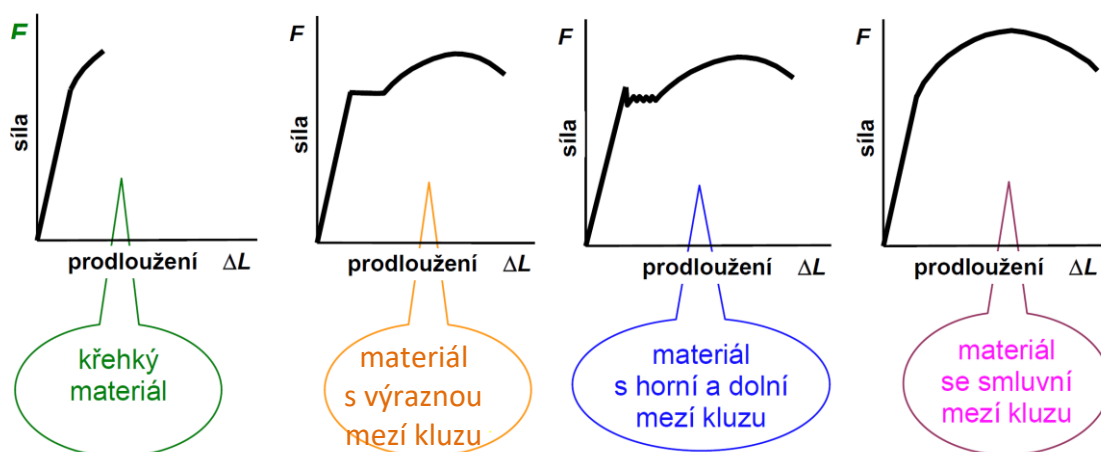
U nepoměrných zkušebních těles nezávisí počáteční měřená délka na počátečním průřezu tělesa. Jsou to např. zkušební tělesa vyrobená z plechů o tloušťce do 3 mm.

2.2. Základní typy tahových diagramů

Vynesení zátěžné síly a prodloužení zkušební tyče do grafu vznikne tahový diagram, v němž je nezávisle proměnnou prodloužení zkušební tyče a závisle proměnnou síla. Základní typy těchto tahových diagramů jsou uvedeny na **Obr. 1**. Moderní elektronické trhací stroje umožňují

automatický průběžný přepočet zátěžné síly na napětí podle vztahu (2) a prodloužení zkušební tyče na poměrnou deformaci podle vztahu (3).

Tahové diagramy potom mohou být vynášeny v souřadnicích σ [MPa] – ε [%]. Počáteční průřez zkušební tyče i počáteční měřená délka jsou konstanty, a proto tahové diagramy vynášené v souřadnicích σ – ε jsou tvarově shodné s diagramy vynášenými v souřadném systému F - ΔL ; na osách jsou však jiné charakteristiky s odpovídajícími měřítky a jednotkami [12].



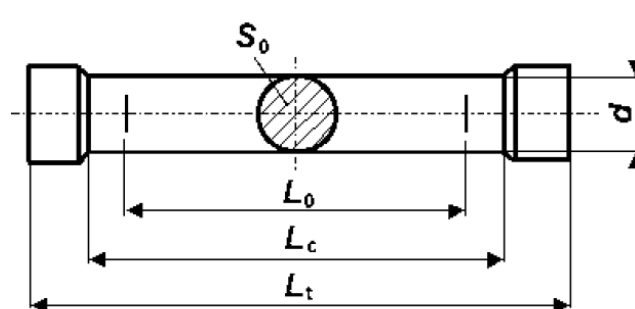
Obr. 1 Základní typy tahových diagramů [12]

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 \quad (3)$$

2.3. Vyhodnocení základních charakteristik

Pro vyhodnocení základních charakteristik se před zkouškou na zkušebním tělese vyznačí počáteční měřená délka a změří se rozměry tělesa, aby bylo možno vypočítat počáteční zkoušený průřez. Příklad tělesa s kruhovým průřezem je zobrazen na Obr. 2. Charakteristikami určovanými ze zkoušky tahem jsou zejména napěťové charakteristiky mez pevnosti a mez kluzu a deformační charakteristiky tažnost a kontrakce, které mají pro tuto práci zásadní význam.



Obr. 2 Příklad zkušebního tělesa pro zkoušku tahem [12]

2.3.1. Mez pevnosti

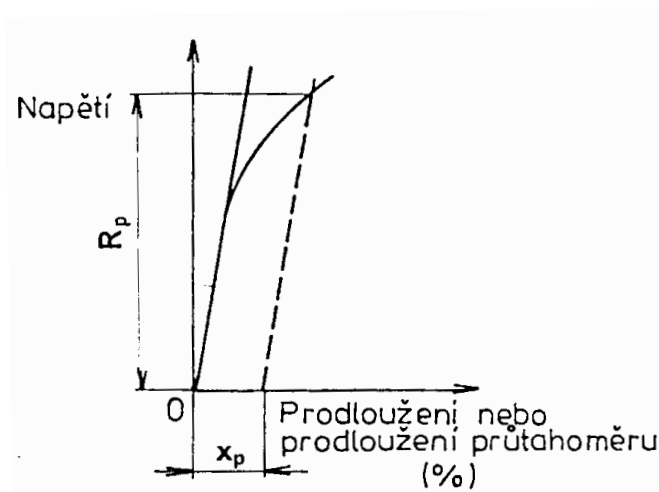
Mez pevnosti v tahu je maximální napětí dosažené ve smluvním diagramu $\sigma - \varepsilon$, což je poměr hodnot maximální síly dosažené při zkoušce a počátečního průřezu zkušebního tělesa, viz rovnice (4).

$$R_m = \frac{F_{\max}}{S_0} \quad (4)$$

2.3.2. Mez kluzu

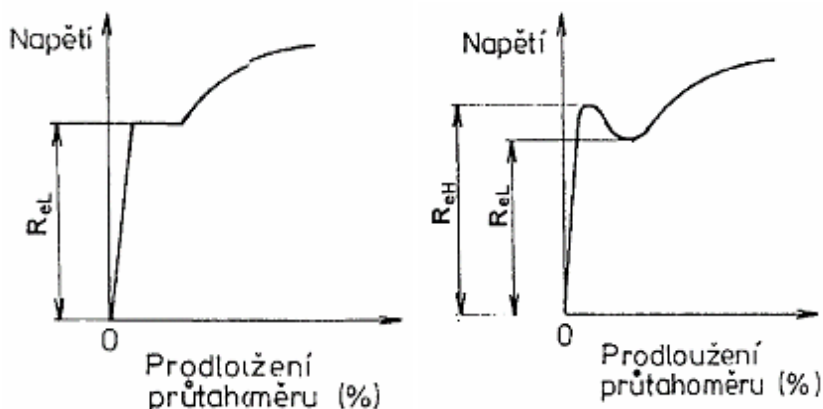
Mez kluzu je definována jako napětí, při kterém se zkoušený materiál začíná plasticky deformovat. Charakter přechodu mezi elastickou a plastickou deformací je dán typem materiálu. Dle naměřené závislosti $\sigma - \varepsilon$ vyhodnocujeme:

1. **smluvní mez kluzu R_p [MPa]**, což je napětí, při kterém plastická deformace dosáhne předepsané hodnoty x_p vyjádřené v % počáteční měřené délky průtahoměru L_e . Označuje se symbolem, jehož index vyjadřuje hodnotu plastické deformace v % - např. $R_{p0,2}$, viz Obr. 3.



Obr. 3 Vyhodnocení smluvní meze kluzu [10]

2. výraznou mez kluzu R_{eH} a R_{eL} , kde R_{eH} [MPa] je napětí odpovídající prvnímu okamžiku poklesu napětí a R_{eL} [MPa] je nejnižší napětí v průběhu plastického kluzu kovu, viz Obr. 4.



Obr. 4 Dolní a horní mez kluzu [10]

2.3.3. Tažnost

Tažnost je poměrná podélná trvalá deformace vyjádřená v % a je dána vztahem (5). Pokud se tažnost měří na poměrných zkušebních tyčích a koeficient proporcionality je roven 5,65, pak se nemusí k symbolu A přidávat žádný index; v opačném případě norma [11] doporučuje značku A doplnit indexem označujícím součinitel proporcionality. U nepoměrných zkušebních tyčí se doporučuje značku A doplnit indexem označujícím použitou počáteční měřenou délku v mm. Některé laboratoře mají zavedené odlišné indexování symbolu A (např. dle DIN 50 145), které vychází z násobků průměru tyče s kulatým průřezem. Např. tažnost A_5 dle tohoto značení znamená, že rysky počáteční měřené délky byly vyneseny ve vzdálenosti pětinasobku průměru kulaté zkušební tyče, ale tato vzdálenost je zároveň stejná hodnota, která po zaokrouhlení vychází při použití vztahu (5) pro $k_p=5,65$. Proto se tažnosti A_5 rovnají tažnostem A .

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (5)$$

Další zajímavou hodnotou je hodnota A_g , plastické prodloužení v procentech měřené průtahoměrem při maximálním zatížení, vhodná zejména pro porovnávání tažnosti u malých vzorků.

2.3.4. Kontrakce

Kontrakce (vyjádřená v %) je největší změna průřezové plochy (vzhledem k původnímu průřezu zkušební tyče), ke které došlo během zkoušky. Nejmenší průřez vzniká v krčku zkušební tyče, kde došlo ke koncentraci napětí a přetržení. Kontrakce je vyjádřena vztahem (6).

$$Z = \frac{S_0 - S_U}{S_0} \cdot 100 \quad (6)$$

3. Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy

Zkouška rázem v ohybu je základní zkouškou hodnocení houževnatosti materiálů. Je měřítkem citlivosti materiálu vůči místní koncentraci napětí při dynamickém namáhání [13]. Historie zkoušek rázem v ohybu sahá až do roku 1901, kdy na sjezdu Mezinárodního svazu pro technické zkoušení materiálu v Budapešti přednášel Francouz G. Charpy o svých zkouškách zjišťování houževnatosti přerážením prismatických tyčí opatřených vrubem. V roce 1909 na V. kongresu v Kodani bylo doporučeno normování Charpyho zkoušky, která se brzy ujala a rozšířila po celé Evropě [14].

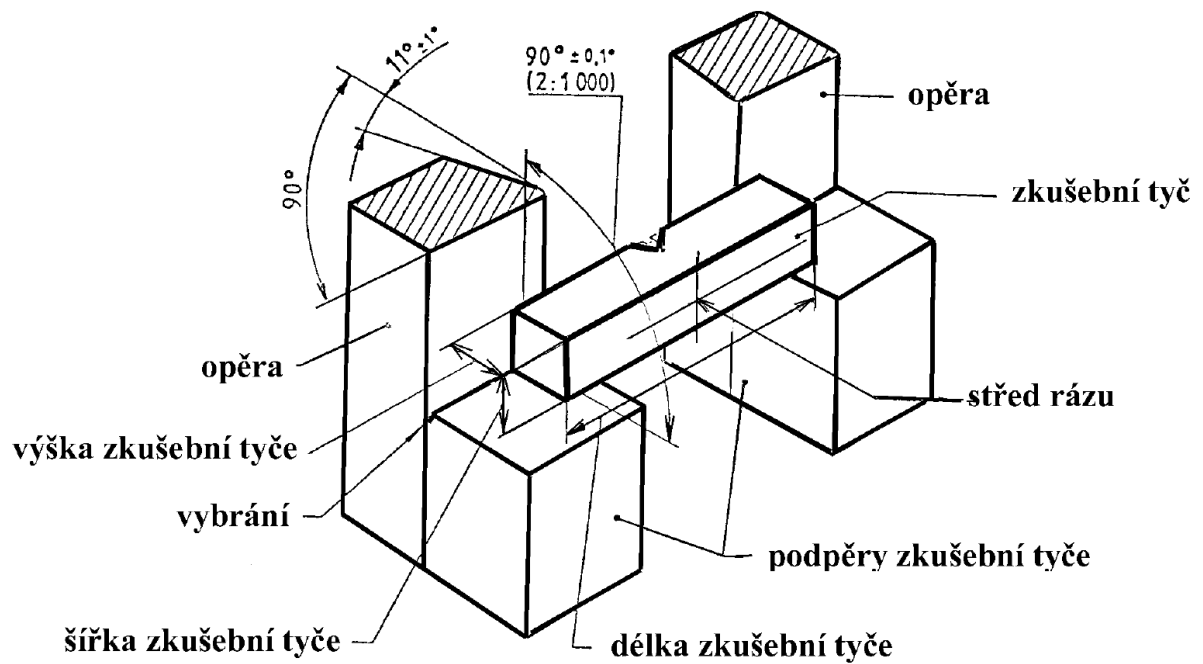
Během 20. století se objevily ještě další metody zkoušky rázem v ohybu (např. podle Izoda) a i samotná tělesa používaná dle Charpyho metody doznala určitých změn – tvar vrubu. V současné době mají tělesa rozměry 10x10x55 mm a jsou opatřena jednostranným V nebo U vrubem. Není-li možné z materiálu vyrobit standardní zkušební těleso, musí se použít jedno z redukovaných zkušebních těles o šířce 7,5 mm, 5 mm nebo 2,5 mm. Podmínky zkoušky popisuje aktuální norma ČSN ISO 148-1 [15], platná od roku 2010.

3.1. Podstata zkoušky

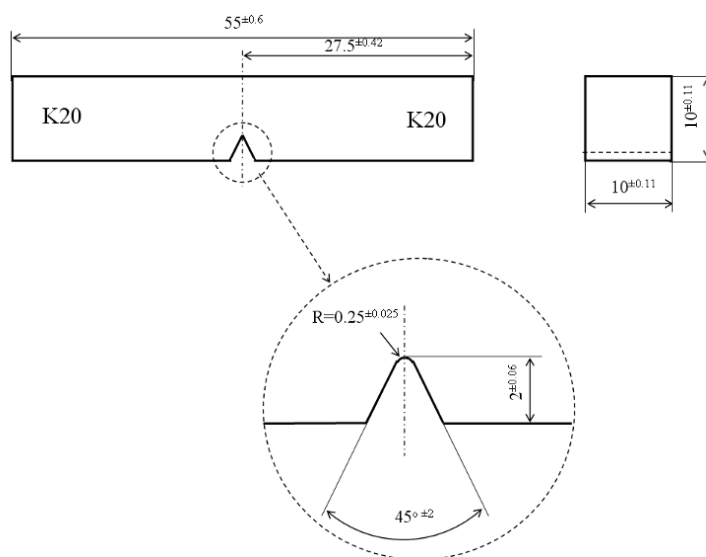
Podstata zkoušky spočívá v přerážení zkušební tyče jedním rázem kyvadlového kladiva za podmínek stanovených normou [15], přičemž zkušební tyč má uprostřed vrub a je podepřena na obou koncích. Měřenou veličinou je nárazová práce, která je měřítkem odolnosti materiálu proti rázovému namáhání a stanovuje se v joulech. Hodnoty nárazové práce **KV** nebo **KU** pak značí, zda se použilo těleso s U nebo V vrubem. Dále je možné se setkat s pojmem vrubová houževnatost, která je dána podílem nárazové práce potřebné k přerážení tyče k počátečnímu průřezu tyče v místě vrubu dle rovnice (7).

$$KCV = \frac{KV}{S_{0(CH)}} \cdot 100 \quad (7)$$

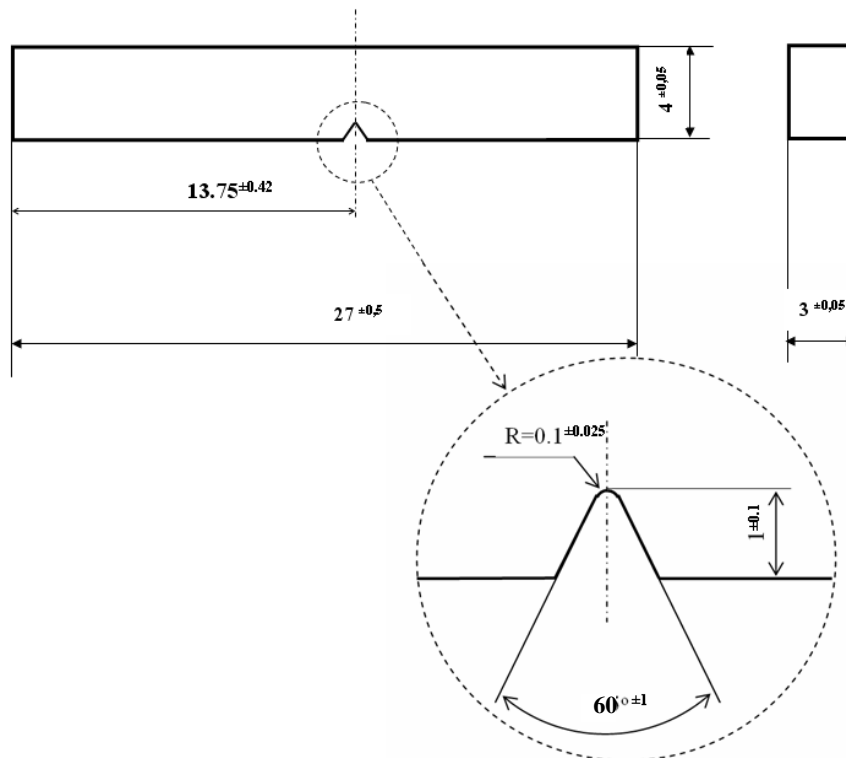
Protože se hodnoty nárazové práce u mnoha kovových materiálů výrazně mění s teplotou, musí se zkoušky provádět při specifikované teplotě. Jedná-li se o jinou teplotu než o teplotu okolí, musí být zkušební těleso zahřáté nebo ochlazené na danou teplotu za řízených podmínek. Umístění zkušební tyče na podporách ukazuje **Obr. 5**. Dle normy [15] lze použít zkušební tělesa s U vrubem nebo s V vrubem. V této práci je použito pouze těleso s V vrubem, jehož geometrie je znázorněna na **Obr. 5**. Jestliže není možné z materiálu vyrobit standardní zkušební těleso, norma povoluje použití těles redukovaných, dále jsou používána mini-Charpy tělesa dle normy [16], jejichž geometrie je znázorněna na **Obr. 7**. Tato tělesa se používají při nedostatku experimentálního materiálu, popř. je lze vyrobit z částí již vyzkoušených standardních těles. Tato tělesa lze také vyrobit z experimentálního materiálu odebraného pomocí zařízení EDSE (viz kapitola 6.1). Pro dosažení předepsané délky 27 mm je třeba v tomto případě navařit (bez tepelného ovlivnění v aktivní části vzorku) oba konce zkušební tělesa. Pro testování standardních těles se obvykle používají kladiva o počáteční energii 300J, které se při dopadu na zkušební tyč pohybují rychlostí cca 5 m/s a pro zkoušení mini-Charpy těles kladiva o počáteční energii 15J a dopadovou rychlostí cca 3,5 m/s.



Obr. 5 Uspořádání zkoušky rázem v ohybu metodou Charpy [15]



Obr. 6 Geometrie zkušebního tělesa pro zkoušky rázem v ohybu metodou Charpy – V vrub



Obr. 7 Geometrie mini-Charpy tělesa pro zkoušky rázem v ohybu

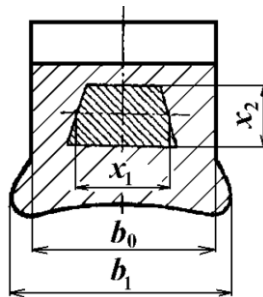
3.2. Vyhodnocení přechodové teploty

Přechodová křivka je závislost velikosti absorbované energie na teplotě zkoušky. Většina používaných konstrukčních materiálů vykazuje tranzitní chování, a proto se v odůvodněných případech provádí vyhodnocení přechodové teploty vymezující oblast použití bez nebezpečí křehkého lomu. Při relativně nízkých teplotách dostáváme nízké hodnoty absorbované energie a křehké lomy (nacházíme se v oblasti tzv. spodních prahových hodnot). Při vyšších teplotách jsou naopak lomy houževnaté a hodnoty absorbované energie relativně vysoké. Jedná se o tzv. oblast horních prahových hodnot. Mezi těmito dvěma oblastmi se nachází přechodová (tranzitní) oblast, kde co do podílu štěpného a tvárného lomu v lomové ploše jsou lomy smíšené a hodnoty vrubové houževnatosti klesají s klesající teplotou z úrovně horních prahových hodnot na úroveň dolních prahových hodnot [14].

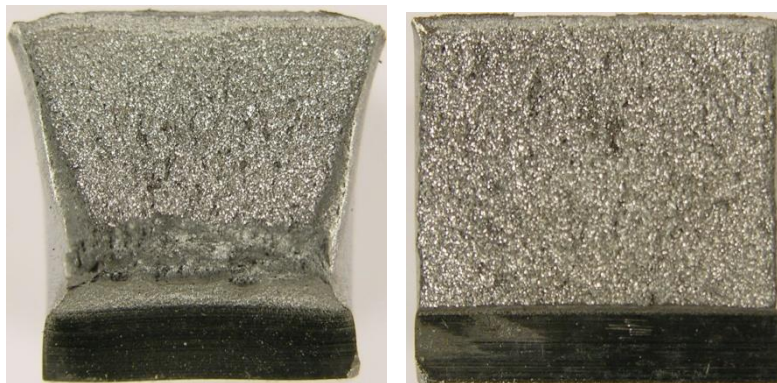
Metod vyhodnocení přechodové teploty je několik. Při hodnocení se vychází buď z vyhodnocení nárazové práce (např. tranzitní teplota při $KV=27$ J nebo jako střední hodnota max. a min. absorbované energie), nebo z vyhodnocení podílu křehkého a houževnatého lomu. Nejběžněji užívanou tranzitní teplotou je teplota t_{50} , což je teplota, kdy je na lomové ploše 50% štěpného (a tedy i 50% tvárného) lomu. V zahraniční literatuře je tato teplota označována jako $FATT_{50}$, což je zkratka vytvořená z anglického názvu teploty: **F**racture **A**ppearance **T**ransition **T**emperature. Podíl křehkého lomu **BF** (Brittle Fracture) se vyhodnotí ze vztahu (8) pomocí měření štěpně porušené oblasti na lomové ploše, viz **Obr. 8**.

$$BF = \frac{x_1 \cdot x_2}{S_{0(CH)}} \quad (8)$$

kde: $x_1 \cdot x_2$ je štěpně porušená oblast
 $S_{0(CH)}$ je plocha pod vrubem



Obr. 8 Způsob vyhodnocení křehkého lomu z lomové plochy [19]

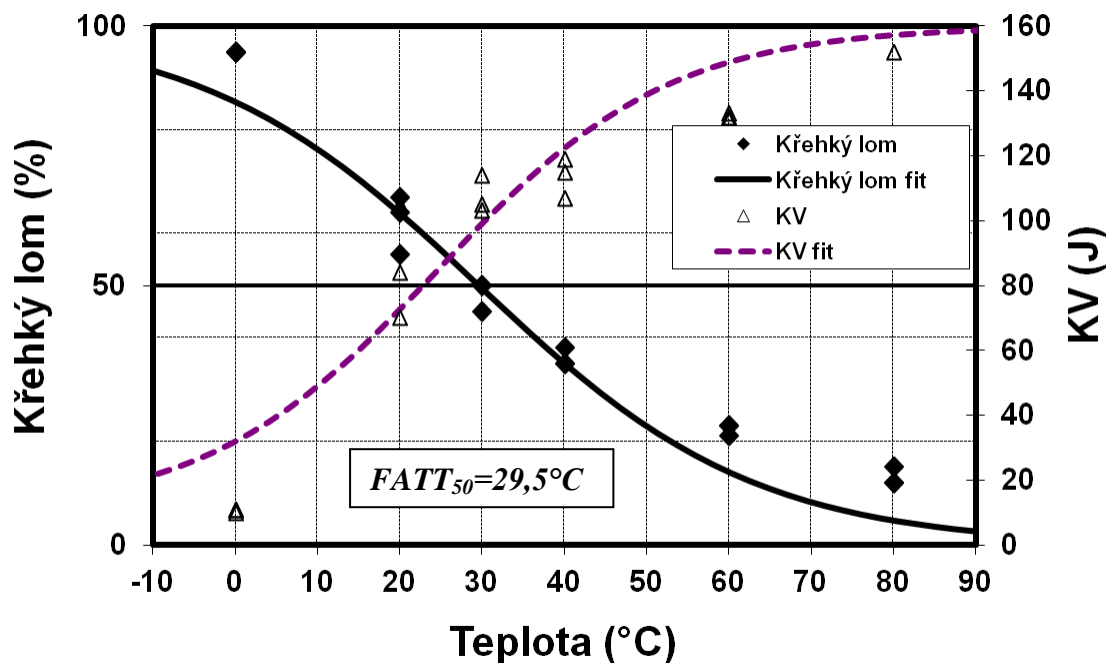


Obr. 9 Příklad hodnocené lomové plochy s 56% BF vlevo a 95% BF vpravo [75]

Přechodová křivka se obvykle vyhodnocuje na sadě 15 vzorků, kdy jsou přeraženy 3 tyče pro každou měřenou teplotu a obvykle se měří nejméně 5 různých teplot. Teploty se volí tak, aby krok mezi nimi byl 20 až 40° C a pokrývaly jak dolní, tak i horní plato prahových hodnot. Následně se vynese křivka závislosti podílu křehkého lomu na teplotě, ze které se určí přechodová teplota $FATT_{50}$ a je znázorněna na **Obr. 10**.

Na zkušebních tyčích, které mají rozměry odlišné od standardních tyčí, naměříme i jiné hodnoty přechodové teploty. V literatuře je závislost mezi tranzitními teplotami stanovenými na zkušebních tělesech různé velikosti nejčastěji popisována vztahem (9), [20][76].

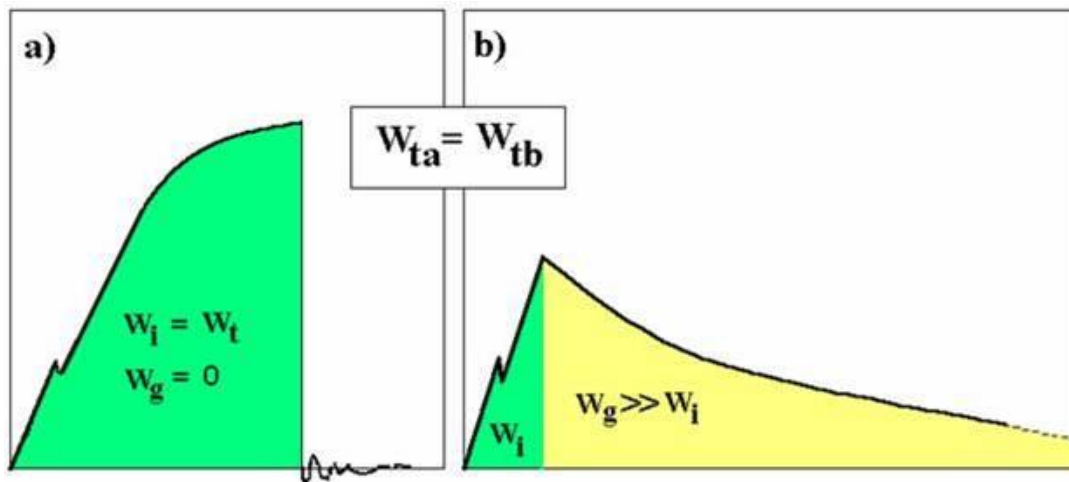
$$FATT_{50\text{full size}} = FATT_{50\text{typex}} + \Delta t \quad (9)$$



Obr. 10 Příklad určení přechodové teploty $FATT_{50}$ [75]

3.3. Instrumentovaná zkušební metoda

Zkouška je realizována stejným způsobem jako základní metoda avšak navíc je měřena síla popřípadě i průhyb vzorku v průběhu zatěžování. Integrací plochy pod křivkou v závislosti síla - průhyb zjistíme velikost práce potřebné na přeražení zkušební tělesa [16]. Výhody instrumentace kyvadlových kladiv pro zkoušky rázem v ohybu spočívají především ve „zviditelnění“ celého lomového procesu, možností porovnávat účinněji různé materiály, vliv odlišného tepelného zpracování atd. Např. hodnoty smluvních energií pro iniciaci a pro šíření trhliny mohou být navzájem porovnávány u různých variant chemického složení a mechanicko-tepelného zpracování téhož materiálu v různém vzájemném poměru, přestože jejich součet může dávat stejnou celkovou absorbovanou energii. Názorný příklad je uveden na Obr. 11.

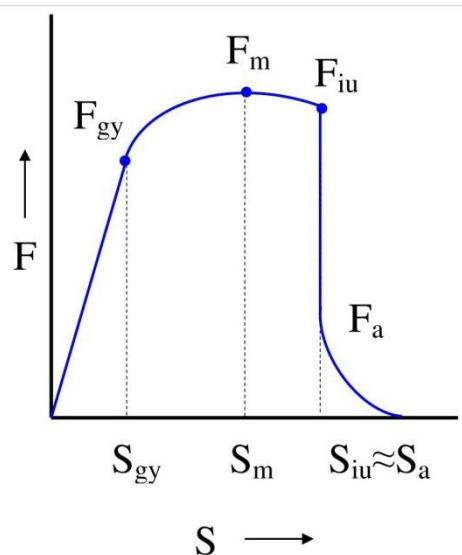


Obr. 11 Odlišné případy chování dvou různých ocelí, které vykazují stejné hodnoty KV [14]

Instrumentovaná zkouška rázem v ohybu je normalizována ČSN ISO 148-1 [15] a řídí se normou ČSN EN ISO 14556: *Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu na kyvadlovém kladivu tyčí Charpy s V-vrubem – Instrumentovaná zkušební metoda z dubna 2016* [16]. Tato norma také popisuje způsob vyhodnocení zkoušky.

Obr. 12 představuje obecný průběh záznamu síla-posunutí, ze kterého je možné vyhodnotit všechny čtyři charakteristické síly, které při instrumentovaném provedení zkoušky rázem v ohybu mohou nastat - F_{gy} , F_m , F_{iu} a F_a .

- F_{gy} mez makroplastických deformací v kN
- F_m maximální síla v kN
- F_{iu} síla v okamžiku iniciace trhliny v kN
- F_a síla při zastavení trhliny v kN



Obr. 12 Stanovení charakteristických hodnot síly při zkoušce rázem v ohybu [16]

Pro přibližný výpočet (s přesností do 20%) podílu křehkého lomu v lomové ploše se používají vztahy (10) až (13). Tyto vztahy byly vyvinuty v různých laboratořích a pro různé ocele s různým stupněm houževnatosti. Volba vztahu by měla být založena na předchozí zkušenosti s chováním zkoumaného materiálu [16]. Pro vyhodnocení podílu křehkého lomu byl v této práci použit vztah (12) jenž byl ověřen pro sledovanou skupinu materiálů.

$$BF = \frac{F_{iu} - F_a}{F_m} \cdot 100\% \quad (10)$$

$$BF = \frac{F_{iu} - F_a}{F_m + (F_m - F_{gy})} \cdot 100\% \quad (11)$$

$$BF = \frac{F_{iu} - F_a}{F_m + K_{CH}(F_m - F_{gy})} \cdot 100\% \quad (12)$$

$$BF = \left[\sqrt{\frac{\frac{F_{gy}}{F_m} + 2}{3}} \cdot \left(\frac{\sqrt{F_{iu}}}{\sqrt{F_m}} - \frac{\sqrt{F_a}}{\sqrt{F_m}} \right) \right] \cdot 100\% \quad (13)$$

kde $K_{CH} \approx 0,5$

4. Zkoušky únavy

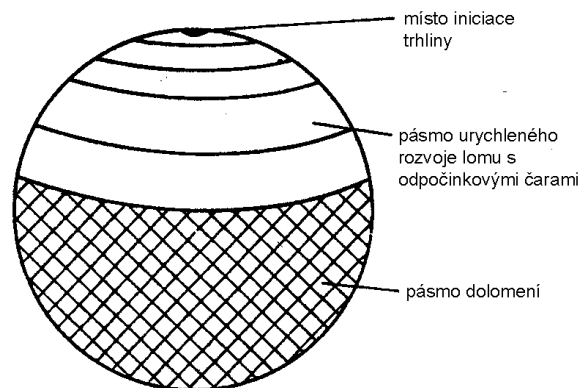
Většina strojních součástí je vystavena cyklickému zatěžování. To způsobuje cyklické napětí, které může vést k mikroskopickému poškození materiálu. I když je napětí nižší než mez kluzu, poškození se kumuluje, až dojde k rozvoji trhliny, jenž má za následek lom součástí. Tento proces kumulace porušení při cyklickém zatěžování se nazývá únava (fatigue) [17]. Výstižná a ucelená definice únavy může znít následovně: Jedná se o progresivní, lokalizované a trvalé poškození struktury materiálu, ke kterému dochází při cyklicky se měnící deformaci při napětích nižších než je statická mez pevnosti daného materiálu.

Únavový lom je v praxi nejčastějším mezním stavem, zhruba 80 až 90% provozních lomů má únavový charakter. K únavovému lomu dochází náhle a má často katastrofické důsledky. Kromě kovových materiálů jsou k tomuto porušení náchylné také polymerní a keramické materiály.

Působící zatížení může být jednoosé (tah, tlak, ohyb) nebo obecně trojosé (např. torzní, nebo kombinované, např. dvojosý tah/tlak, ohyb/kрут apod.). V průběhu únavového zatěžování se napětí může měnit pravidelně, harmonicky, což je nejčastěji reprezentováno např. sinusovým průběhem působícího napětí v závislosti na čase, nebo nahodile, stochasticky. Častým prakticky aplikovaným způsobem je pravidelné opakování určitých stochastických sekvencí (např. úseku reálného zatěžování zaznamenaného při provozu konkrétního zařízení).

Celý únavový proces, od prvního zátěžného cyklu až po závěrečný lom, můžeme rozdělit na tři stádia, plynule přecházející jedno v druhé [1]. První stádium je stádium změn mechanických vlastností, kdy v důsledku kumulace plastické deformace se mění rozložení a hustota dislokací v materiálu. Materiál mění svoje mechanické vlastnosti, cyklicky změkčuje nebo zpevňuje. Druhé stádium je vznik únavových trhlin, kdy v důsledku pokračujících kumulace plastické

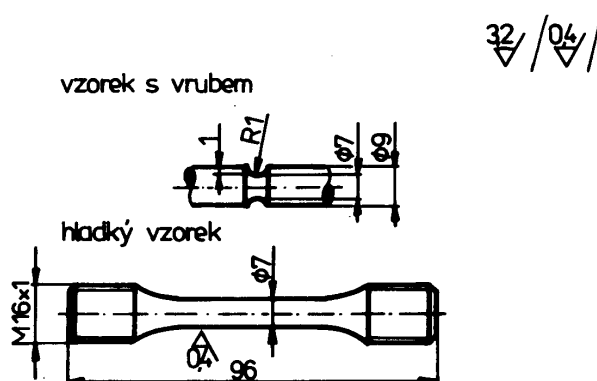
deformace dochází na povrchu vzorku ke koncentraci napětí a deformace v okolí koncentrátorů napětí a ke vzniku prvních mikrotrhlin v těchto místech. Třetí stádium je stádium šíření únavových trhlin. V předchozím stádiu vzniklé mikrotrhliny neustále rostou, přičemž z důvodu nerovnoměrného rozložení napětí a deformace se z některé z nich stane trhlina magistrální. Tato trhlina pak proroste značnou část vzorku, zatímco u ostatních trhlin je růst potlačen. Při překročení kritického napětí ve zbylé části vzorku dojde k závěrečnému dolomení. Třetí stádium je tedy ukončeno únavovým lomem součásti viz **Obr. 13**.



Obr. 13 Schéma únavového lomu [1]

4.1. Zkušební stroje a vzorky pro únavové zkoušky

Na zkušební stroje jsou kladeny značné nároky. Stroj musí umožňovat pevné a stabilní uchycení zkušebních vzorků a zaručit, že se bude deformovat pouze vzorek, a ne rám stroje. Při zkouškách na rezonančních zařízeních musí být tvar a velikost zkušebního tělesa zvolena tak, aby byla splněna rezonanční podmínka pro danou frekvenci zatěžování. Mezi nejznámější zkušební zařízení patří univerzální únavové zkušební stroje fy Schenk, MTS, Amsler, Instron a Zwick. Zkušební tělesa, která se obvykle používají pro laboratorní zkoušky, jsou válcová nebo plochá s jemně broušeným a leštěným povrchem o rozměrech funkční části 6 až 20 mm. Tělesa jsou buď hladká nebo s koncentrátorem napětí (vrub, otvor, osazení) pro stanovení vrubového součinitele K_f viz **Obr. 14**.



Obr. 14 Válcové zkušební vzorky pro únavové zkoušky [1]

4.2. Parametry cyklického zatěžování

Napětový cyklus harmonického opakovaného zatěžování je charakterizován:

-velikostí středního/hlavního napětí, což je průměrná hodnota maximálního a minimálního napětí daného zátěžného cyklu

$$\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 2 \quad (14)$$

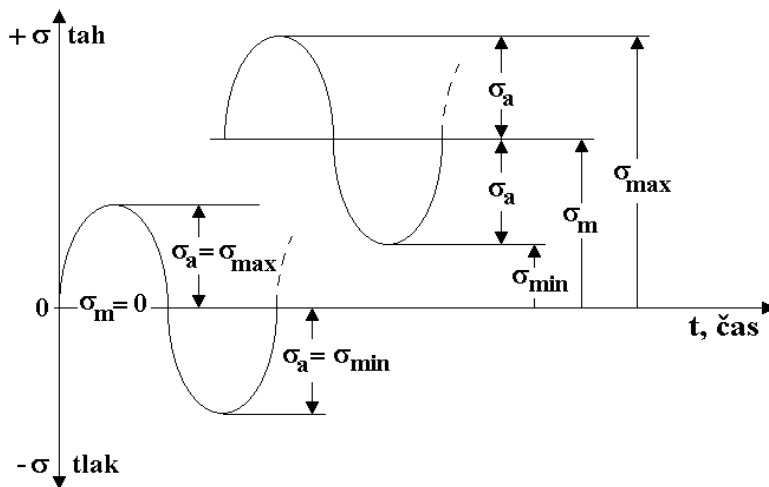
-amplitudou, což je polovina rozkmitu napětí (rozdílu maximálního a minimálního napětí) daného zátěžného cyklu

$$\sigma_a = \sigma_r / 2 = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2 \quad (15)$$

-koeficientem nesouměrnosti cyklu, který je definován jako podíl minimálního a maximálního napětí cyklu

$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} \quad (16)$$

viz Obr. 15.



Obr. 15 Veličiny únavového zátěžného cyklu

Střídavý souměrný cyklus, kdy $\sigma_{\min} = -\sigma_{\max}$, (podle konvence jsou tlaková napětí záporná a tahová napětí kladná) je definován koeficientem nesouměrnosti cyklu $R = -1$, mĳivý cyklus, kdy $\sigma_{\min} = 0$, je definován koeficientem nesouměrnosti cyklu $R = 0$ [17].

4.3. Vyhodnocování únavového chování

K základním mechanickým charakteristikám únavového chování konstrukčních materiálů patří:

- křivka závislosti působícího napětí na počtu cyklů do lomu (tzv. $S - N$ křivka)
- křivka závislosti působící deformace na počtu cyklů do lomu (tzv. $\epsilon - N$ křivka)

Uvedené experimentální metodiky jsou využívány v inženýrské praxi a uvažují materiál/součást jako kontinuum, výsledná křivka, resp. počet cyklů nebo doba do lomu, zahrnuje všechna stadia únavového procesu.

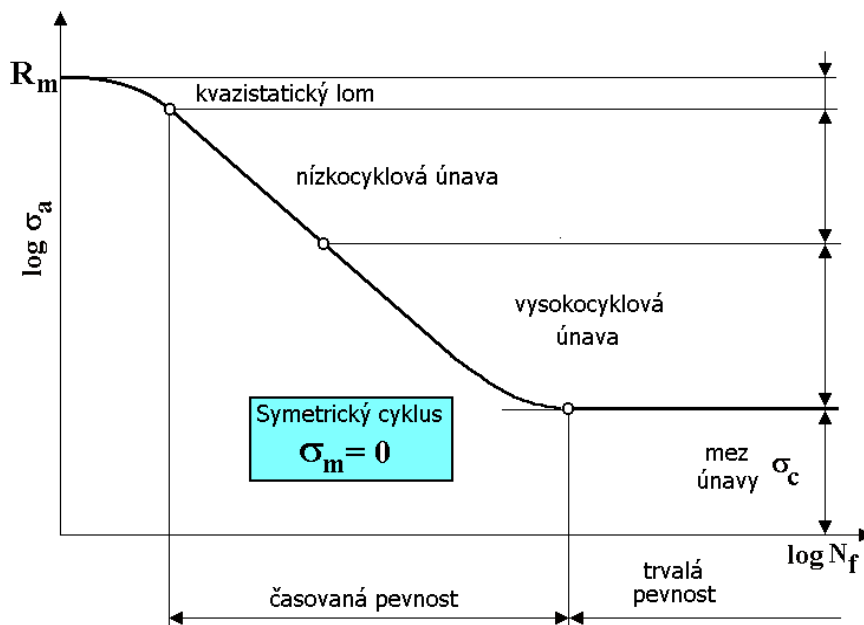
Podobně jako jiné mechanické charakteristiky, také únavové vlastnosti materiálů se určují laboratorními zkouškami. Nejčastěji se jedná o opakované cyklické harmonické zatěžování zkušebních tyčí daným způsobem zatěžování, kdy je registrován počet cyklů do lomu tyče (doba do lomu) odpovídající různé velikosti amplitudy napětí působícího zatížení nebo různé velikosti amplitudy deformace. S rostoucím napětím nebo deformací čas do lomu (počet cyklů do lomu) klesá a naopak s klesajícím napětím (nebo s klesající deformací) se doby do lomu prodlužují, přičemž u slitin železa a slitin titanu dochází k situaci, kdy při určitých úrovních namáhání nedojde k lomu tyče ani po teoreticky nekonečném (v praxi po 10^7) počtu cyklů. Tato hranice se nazývá mez únavy a je definována jako nejvyšší amplituda napětí, při které nedojde k porušení tyče ani po 10^7 cyklů.

Zatěžování zkušebních tyčí se může dít v oblasti, kde relativně vysoká úroveň namáhání vyvolává v průběhu každého zátěžného cyklu jak elastické, tak plastické deformace, a počet cyklů do lomu je tak relativně nízký. Tato oblast se nazývá oblastí tzv. nízkocyklové únavy a představuje časy do lomu v rozmezí přibližně od 10^2 do 10^5 cyklů. Nižší namáhání vyvolává ve zkušební tyči pouze elastické deformace, vede k delším dobám do lomu a příslušná oblast zatěžování se nazývá oblast vysokocyklové únavy, kde doby do lomu se pohybují nad 10^5 cyklů [17].

4.4. Wöhlerova křivka

Pro stanovení Wöhlerovy křivky ($S - N$ křivky) je zkušební tyč (obvykle hladká nevrubovaná tyč konstantního průřezu) zatěžována jednoosým střídavým napěťovým cyklem (tah-tlak). Zatížíme-li několik zkušebních tyčí různými velikostmi amplitudy napětí, dojde k jejich porušení po diferencovaném počtu cyklů a proložením křivky experimentálními body (např. regresní metodou) získáme příslušnou závislost pro daný materiál a způsob zatížení (pro daný koeficient R nesouměrnosti cyklu, čili pro různé hodnoty středního napětí cyklu). Velikost středního napětí cyklu ovlivňuje výslednou křivku životnosti a běžně se prakticky stanovuje pro symetrický zátěžný cyklus (střední napětí je nulové, jedná se o zatěžování tah-tlak), anebo pro míjivý cyklus (střední napětí je stejně velké jako amplituda, takže minimální napětí je nulové, jedná se o zatěžování 0 – tah).

Je-li tato závislost (tzv. Wöhlerova křivka) vynesena v logaritmických souřadnicích, viz **Obr. 16**, rozpadá se výsledná křivka v podstatě na dvě přímky, z nichž klesající větev představuje časovou pevnost, kdy doba do lomu závisí na velikosti amplitudy působícího zatížení a na větev rovnoběžnou s časovou osou, která představuje mez únavy materiálu při daném typu zatěžování. (Mez únavy pro většinu ocelí leží v rozsahu 35 – 60% meze pevnosti daného materiálu v tahu.)



Obr. 16 Wöhlerova křivka při symetrickém zátěžném cyklu [17]

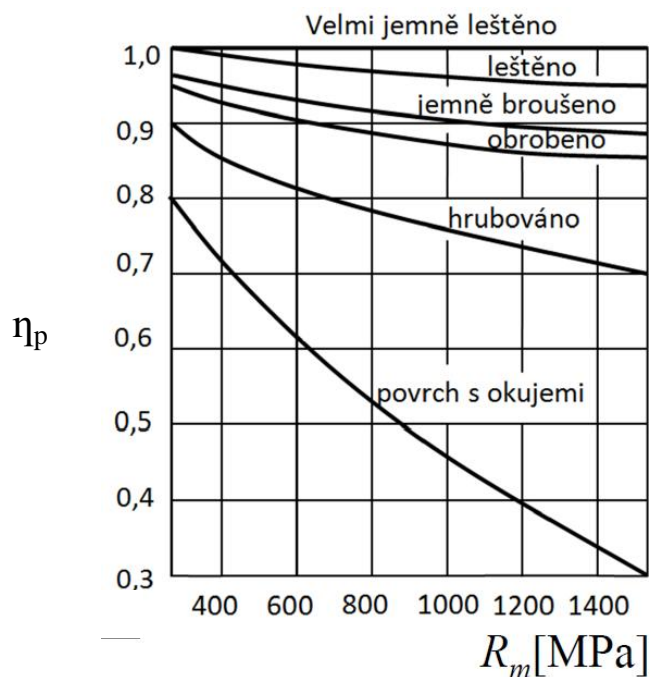
Souhrnně lze Wöhlerovu (S – N) křivku charakterizovat následovně:

- jedná se o cyklické zatěžování konstantní amplituda napětí, nejdůležitější typy zatěžování jsou charakterizovány koeficientem asymetrie cyklu $R = -1$ (střídavé zatěžování) a $R = 0$ (míjivé zatěžování)
- homogenní vzorek/tyč je podroben homogenní (nejčastěji jednoosé) napjatosti
- Wöhlerova křivka nerozlišuje jednotlivá stadia únavového procesu - stadia změn mechanických vlastností, iniciace a šíření trhlin až po konečný lom, a tak neumožňuje hlubší analýzu únavového porušování. Praktický význam spočívá v jednoduchosti jejího získání a způsobu aplikace při dimenzování konstrukcí.

Stejně jako v případě jiných mechanických vlastností i výše uvedené charakteristiky vykazují při jejich experimentálním určování poměrně značný rozptyl, který je způsoben řadou faktorů, např. vlastním rozptylem lokálních mechanických vlastností v důsledku metalurgických a dalších technologických faktorů, a v neposlední řadě i způsobem jejich měření, a sice přesností s jakou jsou dané podmínky zatěžování realizovány (velikost zatěžování, způsob upnutí zkušebních těles apod.). Výsledné křivky závislosti velikosti amplitudy napětí na počtu cyklů do lomu jsou obvykle získány proložení křivky experimentálními body určitou regresní metodou a bývají doplněny křivkami vyjadřujícími pravděpodobnost (např. 95%), že pro dané procento vzorků dojde k porušení v uvedeném rozmezí.

Faktory ovlivňující mez únavy jsou zejména [21]:

- Velikost tělesa – mez únavy s rostoucím rozměrem vzorku klesá (větší pravděpodobnost existence vad, odlišnost povrchu a jádra)
- Gradientu napětí – při ohybu a krutu (napětí roste se vzdáleností od osy), proto je např. mez únavy v ohybu větší než mez únavy v tahu
- Kvalita povrchu – k nukleaci trhlin dochází zpravidla v povrchové vrstvě
- Teploty – s rostoucí teplotou klesá mez únavy
- Konstrukční vruby – koncentrace napětí

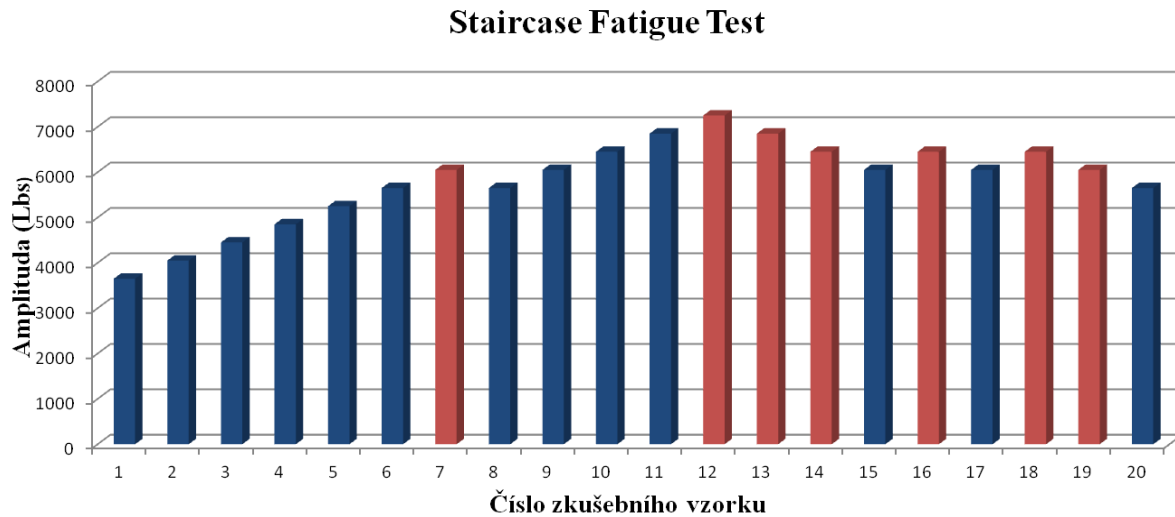


Obr. 17 Příklad vlivu kvality povrchu na mez pevnosti

4.5. Staircase Fatigue Test

Dalším vyhodnocením únavových charakteristik v oblasti VCÚ je např. Staircase Fatigue Test. Jedná se statisticky podloženou metodu vysoko cyklové únavy.

První vzorek je podroben napětí, které odpovídá předpokládané průměrné mezi únavy. V případě, že vzorek vydrží 10^7 cyklů, další vzorek je podroben vyššímu napětí o určitý přírůstek, který by měl být zvolen tak, aby odpovídal očekávané úrovni směrodatné odchylky. Pokud dojde k porušení vzorku před dosažením 10^7 cyklů, další vzorek je zatížen napětím, které je sníženo o daný přírůstek. Tento postup je vhodný pouze tehdy, když je k dispozici vysoký počet zkušebních vzorků. K dostatečně přesnému výsledku je třeba cca 20 zkušebních tyčí. Výsledkem zkoušek může být střední amplituda, standardní odchylka a konvergenční faktor. Na Obr. 18 je příklad vyhodnocení meze únavy pomocí metody Staircase Fatigue Test.

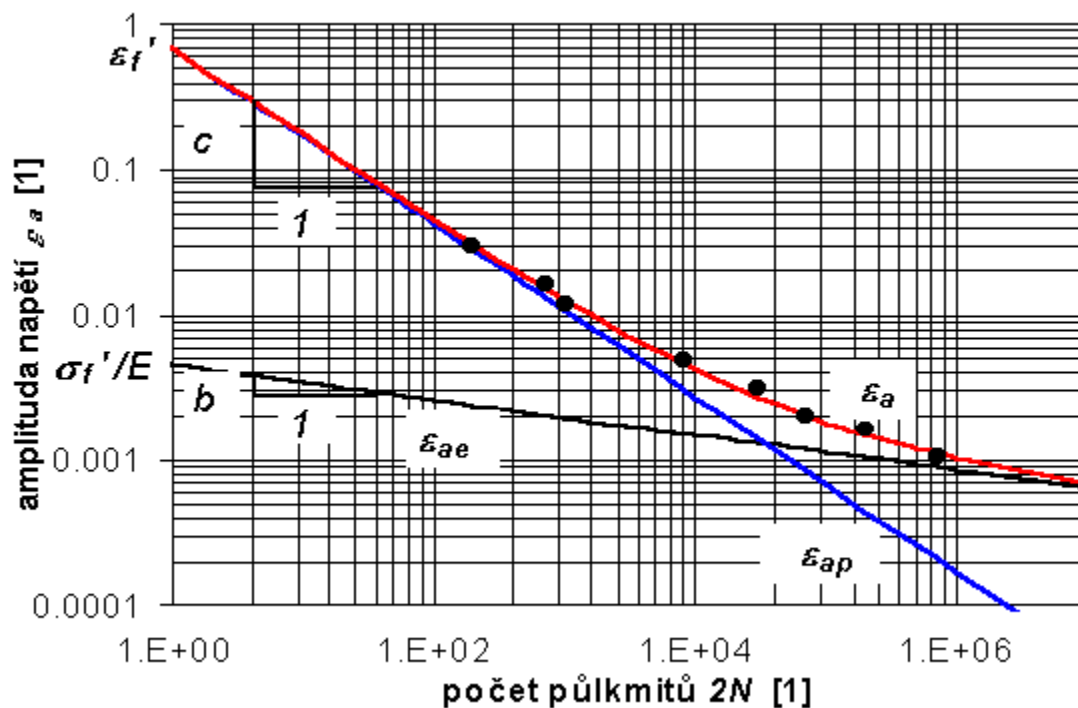


Obr. 18 Příklad vyhodnocení meze únavy metodou Staircase Fatigue Test [25]

4.6. Manson-Coffinova křivka

Druhou významnou charakteristikou únavového procesu je Manson-Coffinova křivka, která je výsledkem cyklického zatěžování těles, kde řídicí veličinou je amplituda plastické deformace (z důvodu experimentální jednoduchosti je řízenou veličinou často amplituda celkové deformace, což se blíží praktickým podmínkám namáhání součástí v místech ostrých vrubů). Manson – Coffinův vztah mezi amplitudou plastické deformace a počtem cyklů do lomu

V případě deformačně řízené únavové zkoušky, typické pro nízkocyklovou únavu, lze popsat změny v materiálových vlastnostech dvěma způsoby, přičemž jedním z nich je popis na základě cyklické křivky napětí-deformace (saturované hysterezní smyčky) a druhým je popis na základě křivky životnosti, kde lze pozorovat tranzitní počet cyklů do porušení N_t . Řídicím parametrem zkoušky je celková amplituda deformace, která je během zkoušky konstantní. Zkoušky by měly pokrýt oblast od 10^2 do 10^5 cyklů do lomu. Výskyt toho typu únavového procesu souvisí především s existencí konstrukčních vrubů dynamicky zatěžovaných strojních součástí, viz **Obr. 19**.



Obr. 19 Manson – Coffinova křivka [23]

5. Zkoušky tečení

Creepové namáhání (tečení) se vyskytuje u materiálů, které jsou převážně určeny pro komponenty tepelných energetických zařízení a určitých zařízení chemického průmyslu, kde jsou vystaveny dlouhodobě mechanickému namáhání a zvýšené teplotě se plasticky deformují. Spolu s plastickou deformací probíhá poškozování materiálu, které může vést až do lomu.

Je třeba stanovit materiálové charakteristiky potřebné pro výpočet součástí pracujících za zvýšených teplot. Tyto charakteristiky se určují zkouškami tečení (creep). Tečení materiálu je možno definovat jako nárůst plastické deformace s časem působením konstantního zatížení (konstantního napětí nebo konstantní síly) pod úrovní meze kluzu, za zvýšených teplot vedoucí po určité době k lomu součásti, která závisí na velikosti působícího zatížení a teploty. Obecně platí, že rychlost tečení se zvyšuje a čas do lomu se zkracuje s vyšší teplotou a větším zatížením [26].

Zkoušky tečení patří mezi zkoušky za zvýšených teplot, které probíhají po delší dobu. Uplatňují se při nich tepelně aktivované děje. Tečení je doprovázeno těmito strukturními změnami:

- Krystalografický skluz, pohyb dislokací v kluzových rovinách
- Tvorba substruktury, pohyb dislokací mimo skluzové roviny
- Tečení po hranicích zrn
- Difuze vakancí a intersticiálních atomů

Metodika zkoušek tečení je popsána normou ČSN EN ISO 204 Kovové materiály - Zkoušení tečení jednoosým tahem - Zkušební metoda z 1. 10. 2009, [27]. Tato evropská norma obsahuje řadu doporučení vypracovaných v Evropské komisi pro spolupráci v oblasti zkoušek tečení (ECCC). Norma specifikuje metodu, definuje vlastnosti kovových materiálů, které mohou být z těchto zkoušek určeny, popisuje požadavky na přístrojové vybavení a měřící aparaturu.

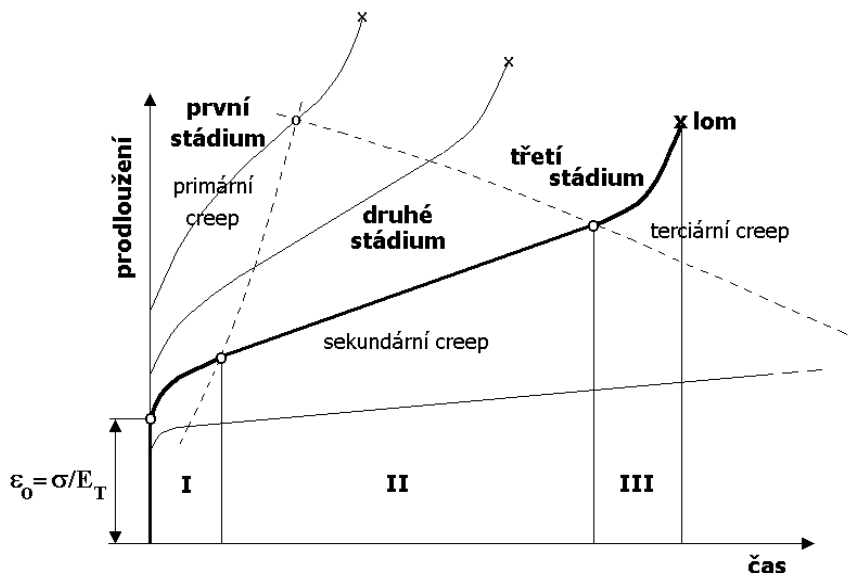
Zkoušky tečení jsou dlouhodobé zkoušky, tímto pojmem označujeme zkoušky o trvání řádově deset tisíc hodin. Nejdelší zkoušky by měly dosahovat minimálně 30% předpokládané provozní doby součásti. To znamená, že při předpokládané životnosti součásti za zvýšených teplot 100 000 h = 11 let budou nejdelší zkoušky prováděné v laboratoři tečení trvat cca 30 000 h = více než 3 roky.

Závislost doby do lomu i průběhu tečení není vztahem funkčním, ale má statistický charakter a proto je nutné očekávat určitý rozptyl výsledků. Příčinou pozorovaných rozptylů mohou být nerovnoměrné vlastnosti zkoušených materiálů nebo nedostatečně přesně dodržované podmínky zkoušení. Rozdílné vlastnosti zkoušených taveb jednoho typu materiálu mohou být dány různou technologií výroby oceli, rozdíly v chemickém složení v rámci povoleného rozptylu, různými podmínkami ochlazování při tepelném zpracování a tím i rozdíly v mechanických vlastnostech a mikrostruktuře materiálu. V oblasti zkoušení mají nejvýznamnější vliv na rozptyl výsledků zkoušek tečení nepřesnosti ve zkušební teplotě. Vypočtené hodnoty meze pevnosti při tečení jsou uváděny jako střední. Možný rozptyl je zohledněn minimální hodnotou meze pevnosti při tečení, která je o 20% nižší, než hodnota střední.[30]

Creepové charakteristiky kovů jsou ovlivňovány teplotou tavení, modulem pružnosti a velikostí zrna. Všeobecně platí, že čím vyšší je teplota tavení daného kovu nebo slitiny, čím vyšší je jeho modul pružnosti a čím větší jsou zrna daného materiálu, tím lepší je odolnost materiálu vůči creepu. Vyšší teplota tavení znamená při dané teplotě nižší homologickou teplotu, vyšší modul pružnosti znamená při daném zatížení menší počáteční deformaci a hrubozrnná struktura snižuje plochu pro rozvoj interkrystalického porušení. Vliv velikosti zrna není veliký ve srovnání s vlivem napětí a teploty při velikostech zrna v intervalu od 0,01 do 1,0 mm obvyklých u polykrystalických kovů a slitin. Homologická teplota je definována jako poměr provozní, eventuálně zkušební teploty T k teplotě tavení daného kovu nebo slitiny T_m (T / T_m). Pro stejnou homologickou teplotu (shodný poměr T / T_m) můžeme získat podobné křivky tečení pro různé materiály. V případě ocelí dochází k tečení při poměru teplot T / T_m vyšších než 0,5.

5.1. Křivka tečení

Nárůst deformace s časem vyjadřuje křivka tečení, která má tři oblasti znázorněné na Obr. 20.



Obr. 20. Křivky tečení [26]

Úsek okamžité deformace, která je výsledkem prodloužení tyče vlivem působícího zatížení. Velikost prodloužení je možno určit pomocí Hookeova zákona (ve většině případů leží působící napětí pod mezí kluzu daného materiálu při dané teplotě) jako podíl působícího napětí a modulu pružnosti materiálu při dané teplotě ($\epsilon_0 = \sigma / E_T$). Poté následuje přechodová fáze, tzv. primární tečení, **primární creep**, kdy rychlost tečení postupně klesá na určitou minimální hodnotu, danou pro daný materiál velikostí teploty a napětí (sklon creepové křivky se s rostoucím časem zmenšuje). Materiál vykazuje vzrůstající odpor vůči creepové deformaci, dochází k deformačnímu zpevnování, přičemž rozhodující roli v této fázi hraje pohyb a nárůst hustoty dislokací (dislokační creep). Následuje fáze ustáleného (stacionárního) tečení, **sekundární creep**, kdy rychlost tečení $\delta\epsilon/\delta\tau$ zůstává konstantní a závislost deformace na čase je tak lineární. Délka tohoto úseku, doba ustáleného tečení, opět závisí na velikosti působícího zatížení a na úrovni teploty. V této fázi dochází v materiálu k rovnováze mezi zpevněním materiálu a jeho zotavováním v důsledku tepelně aktivovaných procesů. S vyšší úrovní teploty a zatížení se doba sekundárního creepu zkracuje a při vysokých hodnotách napětí a teploty může degenerovat do jediného (inflexního) bodu na křivce tečení.

V tomto bodě přechází klesající rychlost primárního creepu plynule do fáze terciárního zrychleného tečení, přičemž délka sekundárního creepu je nulová. V praktických případech doba ustáleného tečení představuje podstatnou část života provozovaných součástí. Závislost mezi rychlostí sekundárního creepu a působícím napětím je při dané teplotě nejčastěji popisována empirickým vztahem

$$d\varepsilon/dt = A \cdot \sigma^n, \quad (17)$$

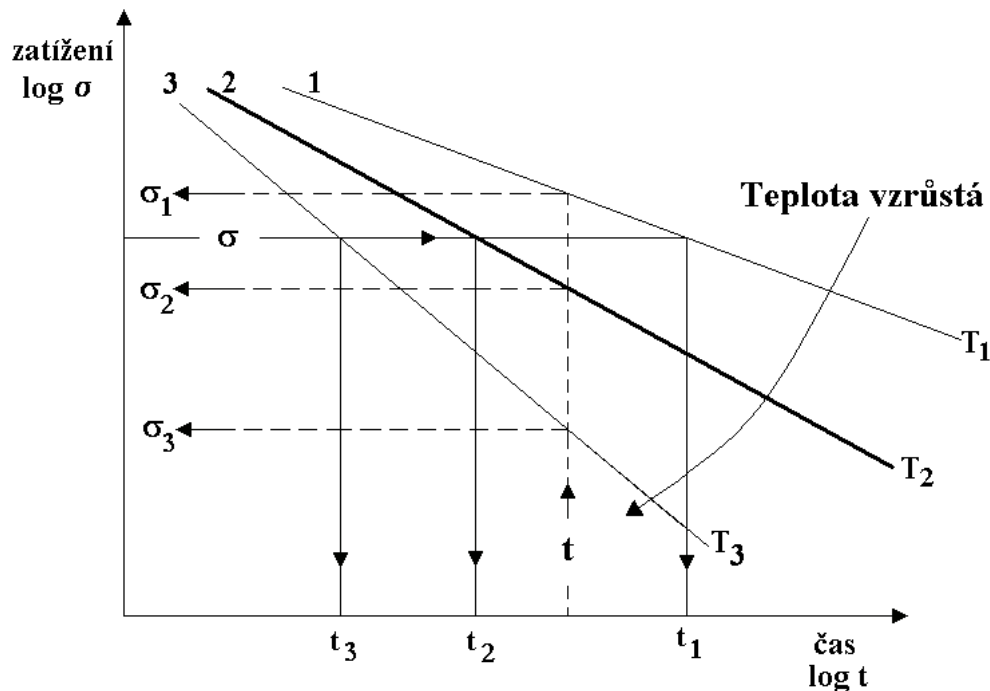
kde A a n jsou materiálové konstanty. (V logaritmických souřadnicích dává tato závislost lineární vztah.) V praktických případech nízkých napětí a relativně vysokých teplot hraje primární roli difúzní creep, probíhající difúzí vakancí na hranice zrn a tvorbou kavit, což vede v důsledku k jejich oslabení a následnému interkrystalickému porušení.

Konečnou fázi předcházející lomu součásti představuje úsek zrychleného tečení, **terciární creep**, ve které rychlost tečení monotónně vzrůstá až do konečného lomu. Ve většině praktických případů (dlouhé doby do lomu) se jedná v podstatě o křehký interkrystalický lom, který je výsledkem tvorby a šíření klínových trhlin v oblasti vyšších úrovní zatížení, resp. tvorby a růstu kavit v oblasti nižších zatížení a dlouhých časů do lomu. (Transkrystalický lom při creepu nastává zejména při vysokých hodnotách zatížení a pro praktické případy je netypický).

Nejdůležitějším parametrem z hlediska praxe je rychlost ustáleného tečení, sekundárního creepu, $d\varepsilon/dt$. Jedná se o veličinu, která je rozhodující při dimenzování konstrukcí pro dlouhodobé aplikace v situacích, kdy creep se stává dominantním poškozujícím mechanismem. V takových případech je limitním faktorem zvětšující se plastická deformace, která nesmí překročit za celou dobu provozu součásti přípustnou hodnotu danou konstrukcí zařízení, [28].

5.2. Dlouhodobá pevnost materiálu

Jiným parametrem, který nalézá praktické uplatnění v případech, kdy rozhodující veličinou není nárůst creepové deformace s časem, ale doba do lomu součásti, je tzv. dlouhodobá pevnost materiálu za zvýšených teplot, **Obr. 21**.



Obr. 21 Závislost působícího zatížení a doby do lomu součásti při různých teplotách [26]

V těchto případech (zkoušek dlouhodobé pevnosti za zvýšených teplot) není nutné registrovat nárůst plastické deformace s časem jako při zkouškách tečení, což znamená technickou komplikaci při provádění zkoušek, ale je zaznamenáván pouze čas/doba do lomu.

5.3. Změny ve struktuře při tečení

Tečení je doprovázeno těmito strukturními změnami:

- krystalografický skluz, pohyb dislokací v kluzových rovinách
- tvorba substrukury, pohyb dislokací mimo kluzové roviny
- tečení po hranicích zrn (pokluzu)
- difúze vakancí a intersticiálních atomů

Rychlost tečení je zásadně řízena pohybem dislokací. Kromě teploty a napětí ovlivňuje vysokoteplotní tečení struktura materiálu (přísady v tuhém roztoku brzdí pohyb dislokací), předchozí plastická deformace za studena (vzniklé spleti dislokací zvětšují odolnost proti tečení) a prostředí (přednostní napadení hranic zrn urychluje tečení). Podíl jednotlivých mechanismů na celkové deformaci při tečení závisí na teplotě a napětí. Většinou je nositelem plastické deformace při tečení krystalografický skluz. Reálný pohyb dislokací se děje v prostředí s překážkami. Překážky pohybu dislokací mohou být zásadně těchto typů:

- bodové (vakantní místa, cizí atomy)
- les ostatních dislokací
- pole napětí sousedních dislokací v rovnoběžných kluzných rovinách
- překážky typu Guiner-Prestonových zón
- stabilní jemný precipitát rovnoměrně rozložený

Dislokace uvízlé na překážkách se mohou osvobodit:

- přesunem překážek (např. koagulací)
- obcházením překážek
- šplháním přes překážky
- příčným skluzem

Zejména proces „šplhání“ (jako tepelně aktivovaný proces) je při tečení velmi významný.

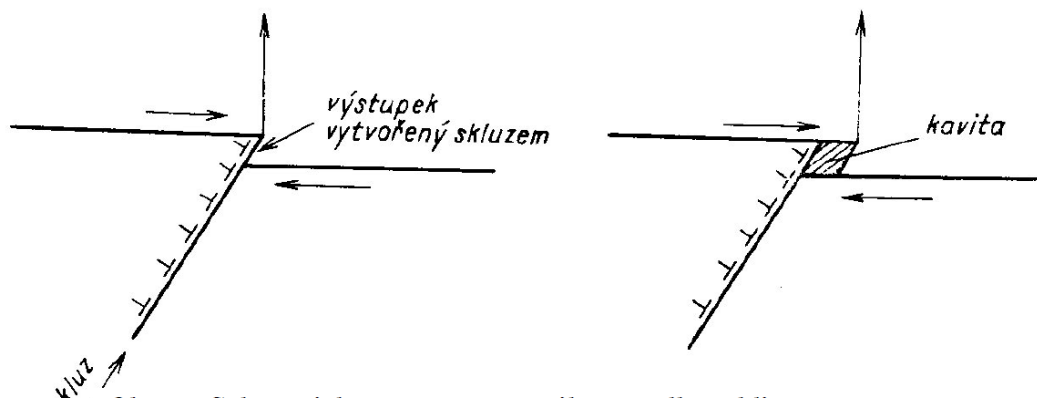
Charakter porušení závisí na napětí, teplotě a rychlosti tečení. Při krátkých dobách a velkých zatíženích má lom charakter převážně transkrystalický. Vysoké nominální napětí uvádí v činnost velké množství zdrojů dislokací, skluzy nebudou soustředěny v malých lokálních objemech, ale naopak bude zasažen velký počet skluzových rovin uvnitř zrna. Tyto skluzové roviny mohou mít stejnou funkci (při nukleaci a šíření trhlin) jako hranice zrn při interkrystalickém porušování. Interkrystalický lom je typický při nižších rychlostech tečení, malých napětích a dlouhých časech do lomu. Deformace nastává především v oblastech kolem hranic zrn, kam se soustřeďuje i iniciace porušování. Při tečení má interkrystalický lom převažující význam [31].

Mechanismus nukleace trhlin

Existují dva základní mechanismy nukleace trhlin – trhliny sférického tvaru a trhliny klínového tvaru.

a) trhliny přibližně sférického tvaru (kavity, trhliny, r-typu), tvoří se hlavně na příčných hranicích ve směru vnějšího napětí, viz **Obr. 22**.

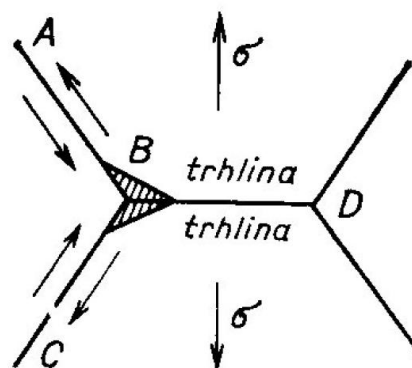
Dutiny/kavity eliptického nebo kruhového tvaru r-typu, se vytvářejí při vysokých teplotách a nižších úrovních zatížení. Nezávisle na mechanismu růstu kavit dochází posléze k jejich spojování, vzniká protáhlá dutina, která ve svém okolí vyvolává silnou koncentraci napětí, čímž dochází k akceleraci růstu původních druhotně vznikajících kavit. Poškození se tak výrazně lokalizuje, vzniká magistralní trhlina, která se šíří skokovitě spojováním kavit před jejím čelem. Při vysokých teplotách, nízkých napětích a dlouhých dobách do lomu tak dochází v průběhu tečení k silné degradaci materiálu interkrystalickou kavitací. Bylo prokázáno, že rychlost růstu magistralní trhliny je úměrná druhé až čtvrté mocnině součinitele intenzity napětí na čele trhliny, a že rovněž existuje jeho prahová hodnota, pod kterou k šíření nedochází. Růst trhliny se řídí zákony lomové mechaniky, přičemž před čelem trhliny dochází ke creepovému poškození a teoreticky může dojít ke konečnému porušení součásti buď tvárným lomem zbývajících průřezu, pokud je materiál součástí za daných podmínek dostatečně tvárným, nebo rychlým křehkým lomem pokud je materiál v křehkém stavu.



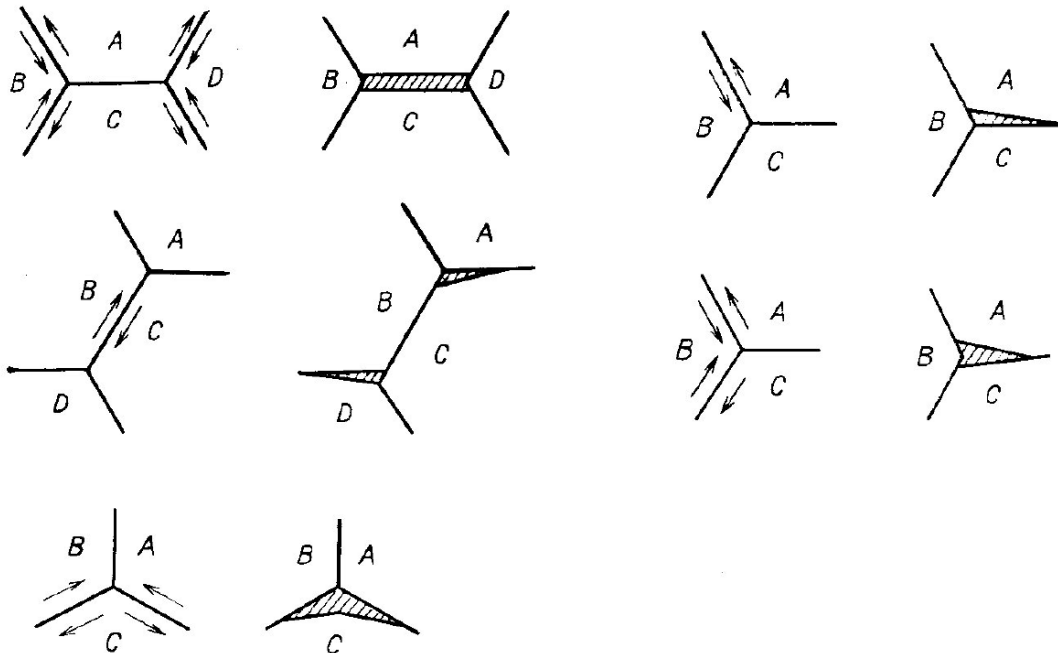
Obr. 22 Schematické znázornění vzniku zárodku trhliny r-typu pokluzem po hranicích zrn [31]

b) trhliny klínového tvaru v místech styku tří zrn - trhliny w-typu, viz (**Obr. 23**)

Proces porušování polykrystalických materiálů při creepu se děje při nižších teplotách a vyšším zatížení pokluzy (které vyvolávají velká tahová pnutí) na styku tří zrn a následnou nukleací a růstem klínových trhlin. Mechanismus jejich vzniku je schematicky znázorněn na **Obr. 23**. Pokluz probíhá podél hranice AB, resp. CB a v místě B, kde nemůže nastat relaxace pnutí vyvolávaného nahromaděním pokluzů po hranicích zrn, vznikne trhlina, která probíhá ve směru BD. Kombinace pokluzů po různých hranicích vede k různým modifikacím tvaru jednoduché trhlinky w-typu (**Obr. 24**). Pravděpodobnost vzniku w-trhlin je snižována migrací hranic zrn, neboť tím, že jedna hranice migruje do nové polohy, může se styk tří zrn přemístit mimo oblast koncentrace napětí a nemusí se porušit koheze. Uvedená skutečnost je významná zejména za přítomnosti precipitátu na hranicích zrn, který značnou měrou omezuje jejich migraci.



Obr. 23 Model vzniku trhlin w – typu [31]



Obr. 24 Různé obměny jednoduchého mechanismu vzniku trhlin w – typu [31]

5.4. Charakteristiky creepové životnosti

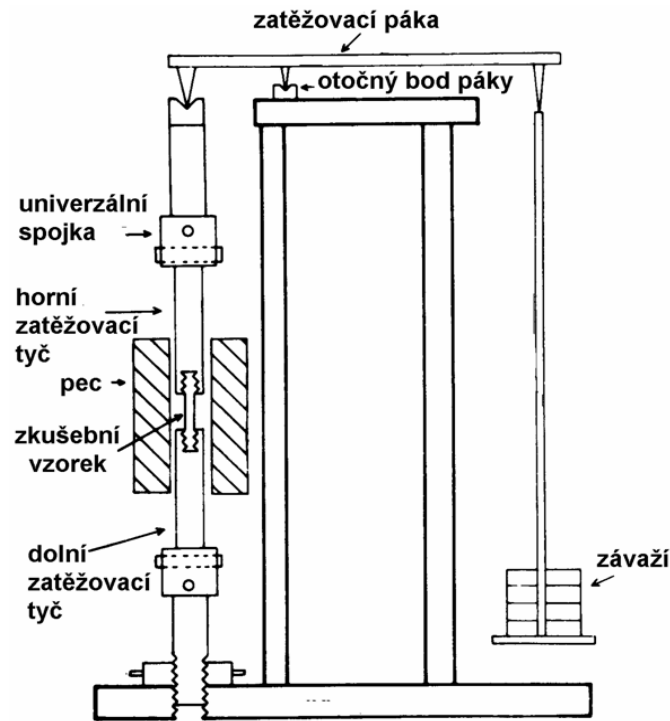
Mez pevnosti při tečení - představuje napětí, které při dané teplotě způsobí porušení/lom za stanovenou dobu. Označuje se R_{mT} a doplňuje se údaji o času do lomu t_f /hod/ a zkušební teplotě $T/^\circ\text{C}$ /, např. $R_{mT} 10^5/680$.

Mez tečení - představuje napětí, při kterém se při dané teplotě dosáhne předepsané deformace za stanovenou dobu. Označuje se R_T a doplňuje se údajem o trvání zkoušky t /hod/ do dosažení deformace ϵ_p /%/ a zkušební teplotě $T/^\circ\text{C}$ /, např. $R_T 10^4/1/550$.

Kromě zkoušek s měřenou deformací se provádějí zkoušky tečení, kde se měří pouze doba do lomu, tažnost A a kontrakce Z stejným způsobem jako u zkušební tyče po zkoušce tahem [28].

5.5. Zkušební zařízení a podmínky zkoušení

Pro provedení zkoušek tečení se používají speciální stroje různého konstrukčního řešení, které lze rozdělit do dvou skupin. Klasické zkušební zařízení, na kterém se zkouší jedna zkušební tyč, je znázorněno na jako náčrt na Obr. 25, vlastní zařízení zobrazuje fotografie na Obr. 26. Druhá skupina jsou zařízení pro hromadné zkoušky tečení, kde je možné současně zkoušet 6 až 200 zkušebních tyčí při různých teplotách a napětích.



Obr. 25 Schéma zařízení pro zkoušky tečení [26]



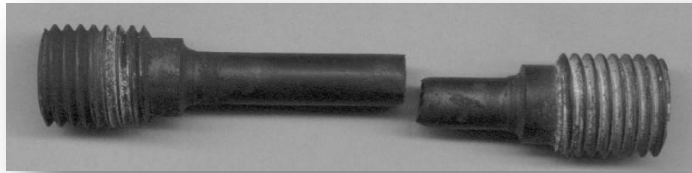
Obr. 26 Zařízení pro zkoušky tečení [28]

Pro měření teploty při zkouškách tečení jsou předepsány zařízení s citlivostí $\pm 1^\circ\text{C}$. Pro měření teplot zkušebních tyčí se používá termočlánků typu S, Pt-PtRh10 o průměru 0,5mm. Přesnost měření těmito termočlánky je $0,1^\circ\text{C}$.

Tvar zkušebních vzorků pro ověřování žárupevných vlastností – zkoušek tečení - závisí na rozměrech ověřovaného výrobku. Zkušební tyče mohou být hladké kruhového průřezu, nebo opatřeny břity pro měření deformace. Kromě základních typů zkušebních tyčí kruhového průřezu se používají zkušební tyče obdélníkového tvaru pro zkoušky tenkostěnných plechů a pásů a některé speciální typy tyčí např. trubkové segmenty. Ukázka používaných zkušebních tyčí je uvedena na **Obr. 27** a **Obr. 28**.



Obr. 27 Ukázka používaných zkušebních tyčí pro creepové zkoušky



Obr. 28 Zkušební těleso po zkoušce tečení [29]

Na zkušebních tyčích s břitů je možné měření deformace pomocí mechanických průtahoměrů. Například je poměrně jednoduché uspořádání měřicího zařízení s indikátorovými hodinkami s přesností 10^{-3} mm, mechanické průtahoměry s kapacitními snímači pracují s přesností 10^{-4} mm. Kromě plynulého záznamu deformace je možno stanovit i průběh deformace na zkušebních tyčích bez břitů a to např. opticky nebo postupným přerušováním procesu tečení a měřením prodloužení stanoveného úseku. U zkoušek tečení svarových spojů můžeme tímto způsobem stanovit délkovou změnu jednotlivých oblastí svarového spoje – základní materiál, tepelně ovlivněnou oblast, svarový kov.

5.6. Stanovení rozsahu zkoušení

Mezi nejdůležitější, parametry zkoušení patří stanovení rozmezí a počtu zkušebních teplot, rozmezí zkušebních napětí a extrapolačního poměru. Extrapolační poměr je poměr doby, na kterou potřebujeme extrapolovat k době trvání nejdelších zkoušek. Na základě dlouhodobých zkušeností je nutné respektovat následující zásady [30]:

- a) Zkoušky tečení je nutné provádět při čtyřech až pěti úrovních teplot (v rozmezí 100°C). Nejvyšší teplota zkoušení by neměla být vyšší o více než 50°C než maximální pracovní teplota.
- b) Při volbě zkušebních napětí je třeba respektovat skutečnost, že v závislosti na napětí lze očekávat působení různých mechanismů tečení a lomu při tečení. Proto se volí široké rozmezí napětí s tím, že nejnižší zkušební napětí bude nižší, než očekávaná hodnota $R_m T$ při nejvyšší pracovní teplotě.
- c) Přípustný extrapolační poměr se má pohybovat v rozmezí 3 až 5. To znamená, že pro stanovení hodnoty $R_m T / 10^5$ je třeba mít k dispozici zkoušky o trvání 20 000 až 35 000 hodin.

V tabulce **Tab. 1** je uveden příklad rozsahu zkoušení pro heterogenní svarový spoj s uvedením polohy lomu na zkušební tyči.

Tab. 1 Příklad rozsahu zkoušek tečení heterogenního svarového spoje [29]

Zkušební	Poř.	Teplota	Napětí	Poloha	Doba do	A	Z
program	č.	[°C]	[MPa]	lomu	lomu [h]	[%]	[%]
1090	1	575	120		[27 117]		
	2	575	140		[6 338]		
	3	575	160	BM1 near HAZ BM1	5 051	14,0	77,4
	4	575	160		7 759	15,2	69,8
	5	600	120		[6 338]		
	6	600	160	BM1 near HAZ BM1	471	20,0	83,0
	7	600	180		115	23,2	85,0
	8	625	60		[27 140]		
	9	625	80		[6 338]		
	10	625	100	FG HAZ BM1	6 661	5,5	7,4
	11	625	140	FG HAZ BM1	118	21,3	85,0
12	650	60		[6 338]			
13	650	80	FG/CG HAZ BM1	2 530	0,7	2,7	

Poznámka:

Doby do lomu uvedena v hranatých závorkách je doba zkoušky, která ještě pokračuje.

Poloha lomu:

HAZ lom v tepelně ovlivněné oblasti základního materiálu v jemnozrnné zóně

WM lom ve svarovém, kovu

BM dolomení v základním materiálu

Z těchto požadavků vyplývá i celkový rozsah zkoušení. Pro spolehlivé stanovení hodnot R_mT pro jednu tavbu je nutné provádět zkoušky tečení o celkové době trvání např. 200 000 hodin. Ještě složitější je vyhodnocování pevnosti při tečení pro značku oceli. Základní problém spočívá v rozdílné žárupevnosti jednotlivých taveb a tedy i rozdílné závislosti doby do lomu na napětí respektive minimální rychlosti tečení na napětí. Pro stanovení žárupevnosti značky ocele je nutné provádět zkoušky tečení na větším počtu taveb a to v takovém rozsahu, aby bylo možno vyhodnotit každou tavbu samostatně, [30].

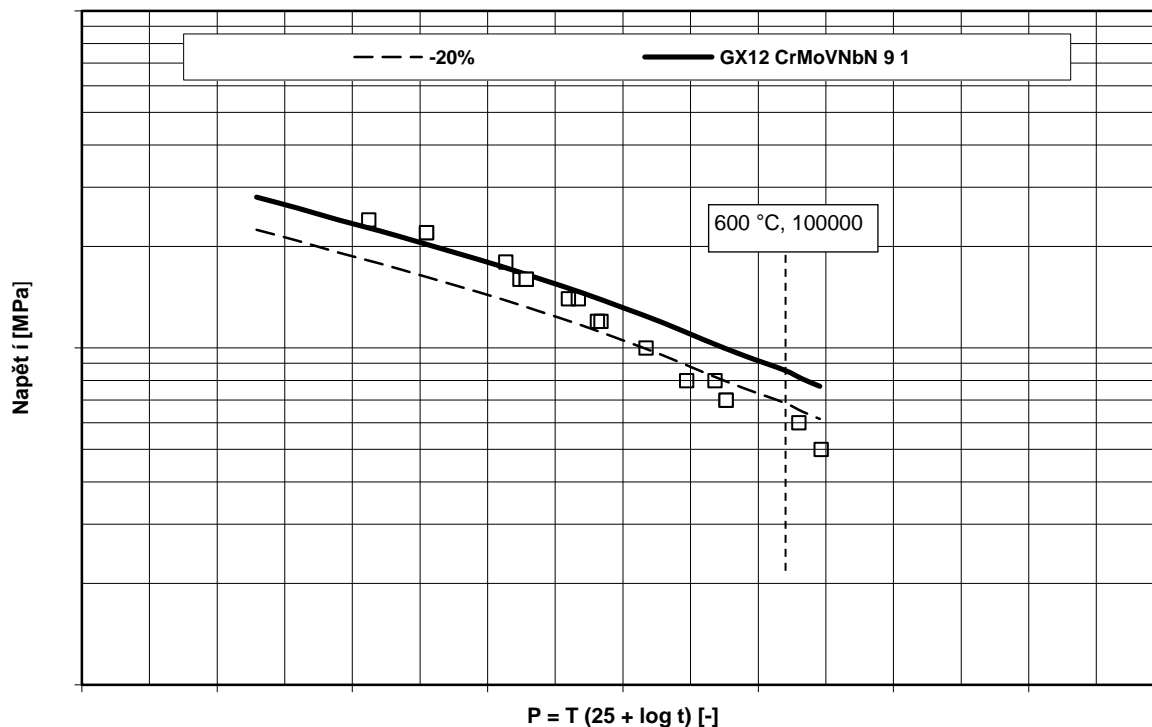
5.7. Stanovení extrapoláčního postupu

Pro vyhodnocování výsledků zkoušek tečení do lomu je možno používat různé parametrické vztahy, které se v podstatě snaží určit dobu do lomu při pracovní teplotě na základě výsledků relativně krátkodobých zkoušek, které se provádějí při vyšších teplotách. Každý empirický vztah, který vyjadřuje závislost doby do lomu na teplotě a napětí, by měl vystihovat dílčí izotermické a izonapěťové závislosti, tj. závislosti do lomu na napětí při konstantní teplotě a závislosti doby do lomu na teplotě při konstantním napětí. Jedním z nejpoužívanějších parametrických vztahem Larson-Millerův (LM) parametr. Tato extrapolace vychází z předpokladu, že tečení je tepelně aktivovaný proces, jehož rychlost se řídí Arrheinovým vztahem [1] a lze proto při průběhu dějů nahrazovat vzájemně vliv teploty a času:

$$T_1(C+\log t_1) = T_2(C+\log t_2) \quad (18)$$

Znamená to, že účinek teploty T_1 po dobu t_1 je rovnocenný účinku teploty T_2 po dobu t_2 . Děj při teplotě T_1 po velmi dlouhý čas t_1 lze tedy nahradit dějem podstatně kratším, ale při vyšší teplotě. C je materiálová konstanta, pro feriticko-perlitické oceli $C=20$.

Příklad vyhodnocení zkoušek tečení v diagramu závislosti napětí, parametr LM je na **Obr. 29**. Jedná se o výsledky zkoušek tečení homogenní svarového spoje oceli P91, kde zkušební tyče byly zhotovené tak, aby svar byl umístěn ve středu zkušební tyče, materiálová konstanta C je pro ocel P91 = 25. V diagramu je srovnání základního materiálu – plná čára, zohlednění rozptylu minimální hodnotou meze pevnosti při tečení, která je o 20% nižší a výsledků patnácti jednotlivých zkoušek svarového spoje.



Obr. 29 Příklad výsledků zkoušek tečení homogenní svarového spoje oceli P91 [29]

6. Zkoušky miniaturních těles

V předkládané dizertační práci je v rámci mechanického zkoušení pomocí miniaturních těles věnována pozornost metodě Small Punch Test a Small Punch Creep Test. Dalšími diskutovanými metodami jsou M-TT [4], zkouška rázem v ohybu na mini-Charpy tělesech, zkoušky únavy na mini vzorcích typu „motýlek“ Small Fatigue Test a mini vzorcích pro zkoušky tečení. Pro všechny zmíněné zkoušky lze vyrobit zkušební vzorky z experimentálního materiálu odebraného odběrovým zařízením semidestruktivním odběrem.

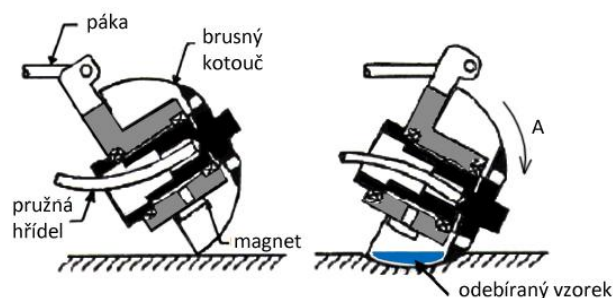
Cílem je použití takového zkušebního tělesa, které využívá minimální objem experimentálního materiálu, ale zároveň je zatěžováno co nejvíce shodným způsobem zatížení jako standardní zkouška např. tahem, zkouška tečení, kde pro určení tahových, creepových vlastností je vzorek zatížen pouze v tahovém (jednoosém) módu zatížení.

6.1. Odběr materiálu

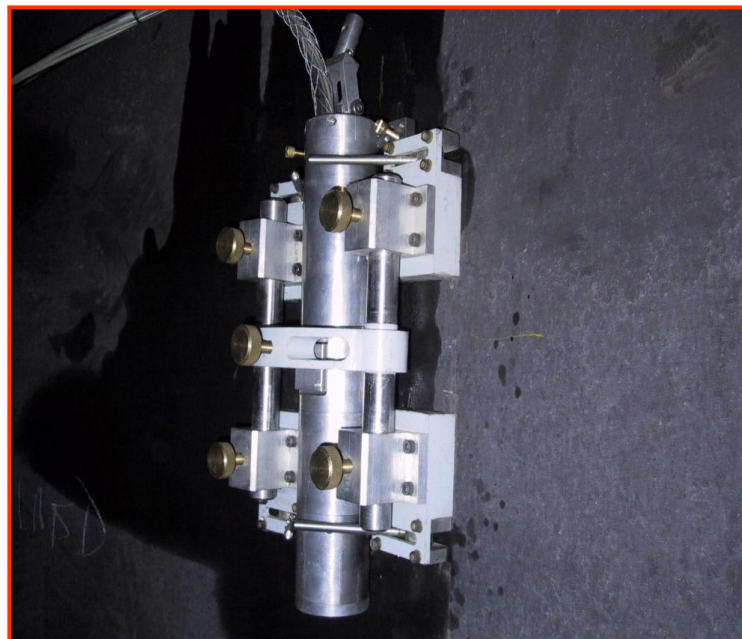
Klasický odběr zkušebního tělesa představuje destruktivní zásah do celistvosti součásti, ať už se jedná o odběr strojním obráběním, tepelným dělením, nebo dalšími způsoby. Uvedené destruktivní metody vyžadují následnou opravu odebraného místa. Většinou se jedná o opravu navařováním, včetně následného tepelného zpracování a řady nedestruktivních kontrol. Toto místo se pak může stát zdrojem případných dalších poruch včetně možnosti koncentrace napětí a vzniku trhlin při dalším provozu.

Klíčovým problémem je tedy odběr vzorků materiálu zejména z provozovaných komponent zařízení (s možnou životností dvacet a více let) takovým způsobem, aby nedošlo k ovlivnění součástí, ani aby vlastnosti materiálu nebyly ovlivněny procesem odběru. Pro odebírání malých vzorků bylo vyvinuto např. odběrové zařízení SSamTM-2.

Pro získání materiálu z provozovaného zařízení máme v současné době dvě možnosti tak zvaného semi-destruktivního odběru. Tento název vysvětluje, že se nejedná o nedestruktivní metodu, ale po provedení takového odběru není nutné provedení následné opravy místa odběru. K tomu slouží např. historicky starší odběrové zařízení SSamTM-2 firmy Rolls-Royce [5] nebo modernější zařízení EDSE [6][7]. Zařízení SSamTM-2 je vyobrazeno na **Obr. 30** a **Obr. 31**. Princip spočívá ve velmi pomalém odbrušování mezivrstvy mezi odebíraným vzorkem a součástí pomocí rotujícího nástroje ve tvaru vrchlíku o tloušťce 0,7 mm a průměru 50 mm. Tento nástroj za intenzivního chlazení vodou pomalu proniká do základního materiálu a odebírá tak vzorek materiálu ve tvaru kulového vrchlíku.



Obr. 30 Schematické znázornění odběru pomocí zařízení SSamTM-2 fy Rolls-Royce [5]



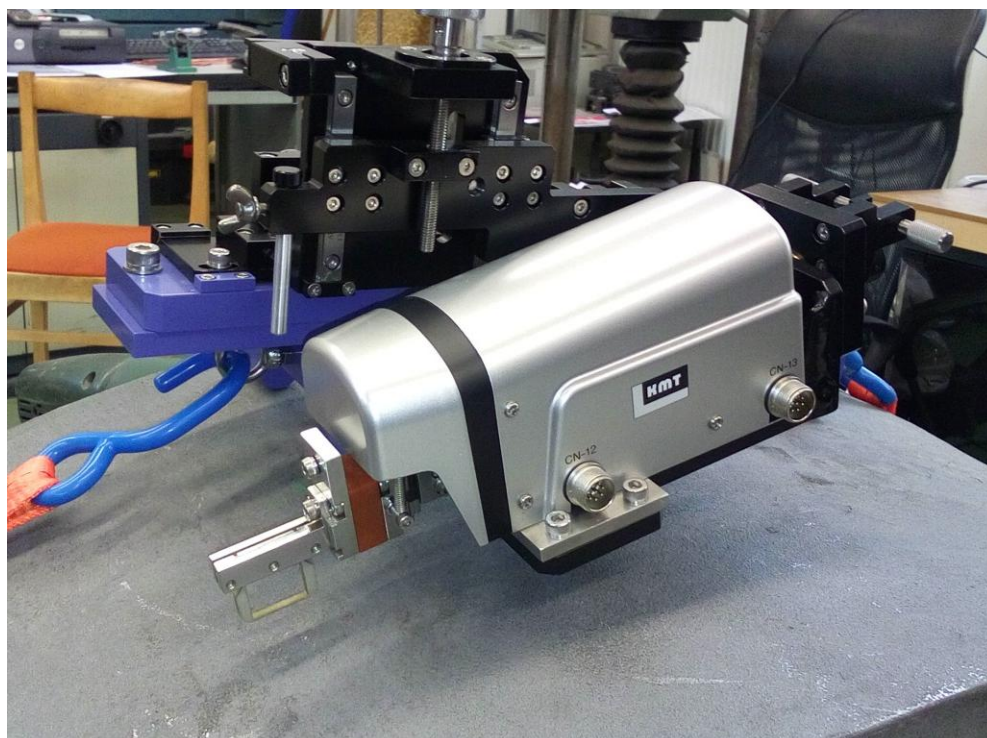
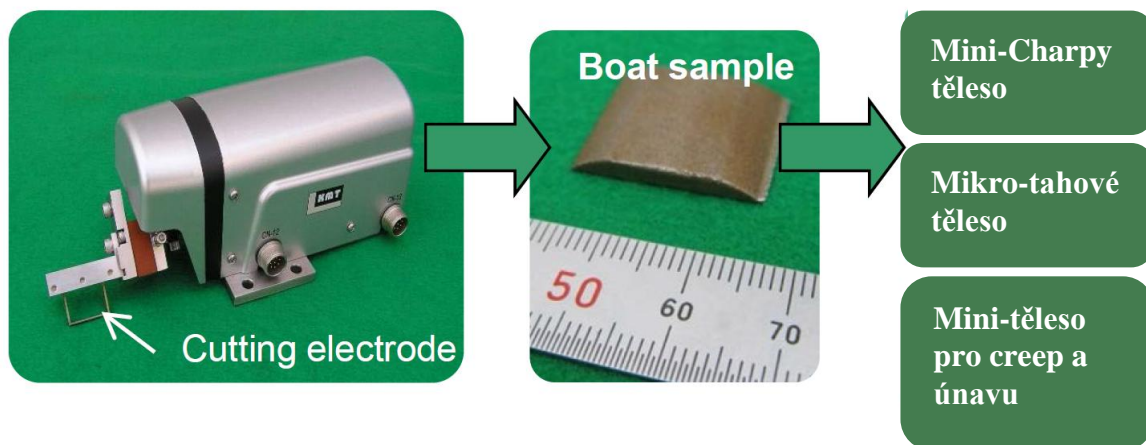
Obr. 31 Odběrové zařízení SSamTM-2 [5]

Proces odběru části materiálu trvá jednu až tři hodiny, podle druhu materiálu a místa odběru. Výsledkem je vzorek materiálu ve tvaru kulového vrchlíku o poloměru cca 25 mm a výšce 3 – 4 mm. Kombinace vysoké obvodové rychlosti odbrusovací hlavice, pomalého posuvu do záběru a současného intenzivního chlazení vodou eliminuje tepelné a deformační ovlivnění odebíraného vzorku materiálu. Konstrukce odběrového zařízení SSamTM-2 fy Rolls-Royce umožňuje odběr jak na vnějším, tak na vnitřním povrchu testované součásti (metoda vhodná pro tlakové nádoby, potrubí apod.). Z odebraného vzorku materiálu je možno připravit až 4 zkušební tělesa tvaru disku pro SPT (viz **Obr. 32**).



Obr. 32 Disky pro testy SPT odebrané ze zkušebního materiálu [33]

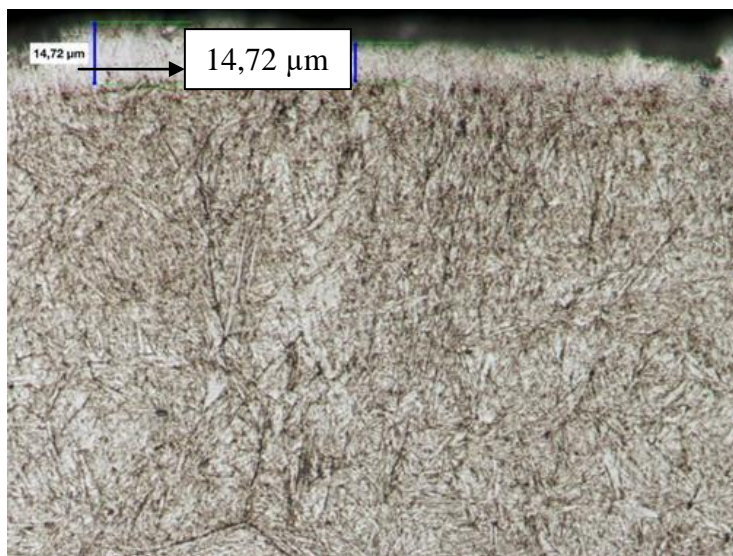
Dále je také možno použít odběrové zařízení EDSE (Electrical Discharge Sampling Equipment) vyvinuté v Japonsku [6]. Toto zařízení využívá pro odběr materiálu elektrojiskrové obrábění. Řezací elektroda má v rozích zaoblení a není tak potřeba vzniklou dutinu opravovat. Velikost odebraného vzorku závisí na použité elektrodě a nastavení hloubky odběru, standardní vzorek má rozměr 20x25x3mm a nazývá se „Boat sample“ neboli lodička. Z odebraného vzorku lze vyrobit několik miniaturních těles pro různé typy zkoušek, viz **Obr. 32**[7]. SPT disk i mikro-tahové těleso lze v rámci odebraného materiálu vyrobit v celé velikosti, pro mini-Charpy těleso je třeba navařit (bez tepelného ovlivnění) oba konce pro dosažení délky 27 mm a poté je již možno toto těleso zkoušet standardním způsobem **Obr. 34**. Příklad odběru je vyobrazen na obrázku **Obr. 35a**. Hloubka ovlivněné vrstvy je minimální, na metalografickém výbrusu činí řádově 15 μm , jak je znázorněna na obrázku **Obr. 35b**.



Obr. 33 Odběrové zařízení EDSE, odebraný vzorek a z něj vyrobitelná miniaturní tělesa [7]



Obr. 34 Polotovar pro výrobu mini-Charpy těles, vlevo - po zavaření, vpravo – broušený na rozměr



Obr. 35 a) Odebraný vzorek pomocí EDSE

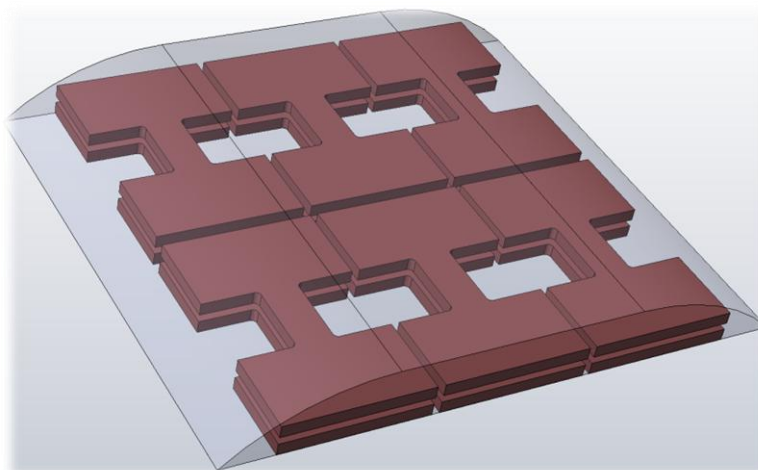
b) Hloubka ovlivněné vrstvy [66]

Doba odběru trvá jednu až tři hodiny, podle druhu materiálu a místa odběru a i tímto zařízením lze odebrat vzorek jak z vnějšího tak vnitřního povrchu komponenty.

Ze vzorku odebraného materiálu oběma způsoby lze provést tyto zkoušky:

- analýzu chemického složení včetně lokální mikroanalýzy, hodnocení obsahu vodíku
- kompletní strukturní analýzu materiálu metodami světelné a transmisní elektronové mikroskopie, včetně fázové analýzy
- hodnocení korozní odolnosti, včetně odolnosti vůči koroznímu praskání
- hodnocení materiálových vlastností za normální teploty pomocí malých zkušebních těles, stanovení meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti materiálu
- hodnocení základních mechanických vlastností za snížených nebo za zvýšených teplot,
- hodnocení křehkolomových vlastností stanovením přechodové teploty
- hodnocení únavových vlastností,
- stanovení úrovně poškození u materiálů pracujících v creepové oblasti teplot a stanovení základních creepových charakteristik,

Příklad návrhu umístění zkušebních tyčí v odebraném vzorku materiálu pomocí odběrového zařízení EDSE – typ lodička je na **Obr. 36**.



Obr. 36 Příklad návrhu umístění zkušebních tyčí v odebraném vzorku materiálu [4]

6.2. Small Punch Test

Potřeba vyhodnocovat lokální aktuální mechanické vlastnosti provozovaných zařízení vedla k navržení nových testovacích metod na miniaturních tělesech. Jednou z nich je metoda Small Punch Test (SPT) a v české literatuře (např.[33][35]) se též označuje jako protlačovací či penetrační test.

6.2.1. Vznik metody Small Punch Testu

Metoda Small Punch Test byla navržena a vyvinuta v USA na MIT (Massachusetts Institute of Technology) a poprvé ji představil Manahan v roce 1981. Účelem této metody bylo zkoumání radiačního zkrěhnutí materiálů používaných v jaderných elektrárnách vystavených radiaci a zvýšeným teplotám [36].

K velkému vývoji této metody došlo v Japonsku, kde na této metodě pracovali zejména Mao, Takahashi a kol.[37]. Dále probíhaly práce, které se snažily určit přechodovou teplotu

FATT₅₀ a lomovou houževnatost [38]. Výzkum této metody probíhal a dále probíhá na poli únavových a creepových vlastností a stále více se rozšiřuje i analytický přístup, který používá např. metody konečných prvků nebo metodu neuronových sítí.

Vzhledem k tomu, že výsledky SPT nejsou přímo převoditelné na hodnoty ze standardních zkoušek, bylo nutné sjednotit podmínky zkoušení - zejména geometrii přípravku a zkušebního disku, neboť na výsledky zkoušek mají zásadní vliv. První pokusy o standardizaci těchto zkoušek byly učiněny a publikovány na JAERI (Japanese Atomic Energy Research Institute) v roce 1988. Od roku 1992 je tato metoda známa i v Evropě, kde ji představila Swansea University ve Walesu a dále pak CISE (nyní CESI) v Itálii. V současné době je vypracován postup, který sjednocuje podmínky zkoušení této metody. V září roku 2004 inicioval Evropský výbor pro normalizaci (CEN) vznik dokumentu CWA 15627 (CEN Workshop Agreement): „Small Punch Test Method for Metallic Materials“ [8].

CWA je technická dohoda v rámci CEN a vlastněná CEN jako publikace, která odráží konsenzus konkrétních expertů a organizací odpovědných za její obsah. CWA proto reprezentuje nižší úroveň konsenzu, než jakou představuje evropská norma. Dokument CWA 15627 je rozdělen do dvou samostatných částí:

- Part A: A Code of Practice for Small Punch Creep Testing.
- Part B: A Code of Practice for Small Punch Testing for Tensile and Fracture Behaviour

V současné době je dokument CWA v návrhu ASTM v komisi E10.

6.2.2. Výhody a nevýhody SPT

Standardní mechanické zkoušky potřebují velmi mnoho cenného experimentálního materiálu na výrobu zkušebních těles. V případě odběru např. z tlakových nádob z jaderných reaktorů, ve kterých je umístěno jaderné palivo, zde nastává další problém s vysokými hodnotami záření standardních zkušebních těles. SPT vyhovuje současnému trendu, kterým je co největší miniaturizace zkušebních těles.

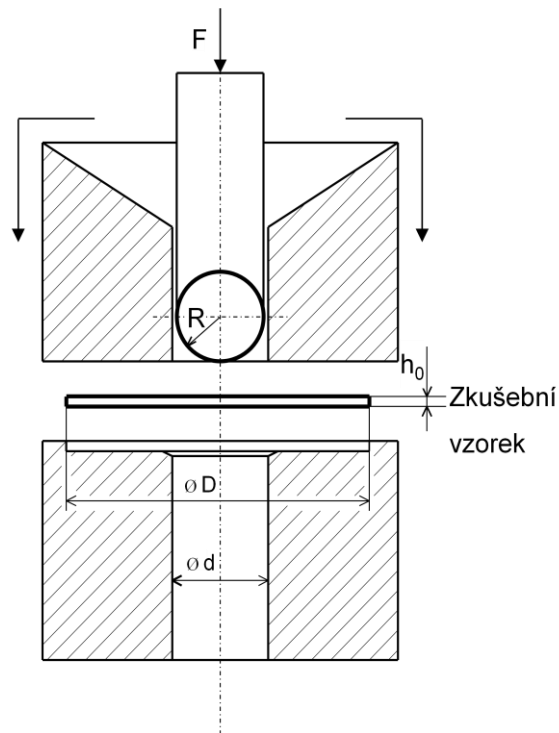
Největší výhody SPT jsou:

- nízká spotřeba experimentálního materiálu
- použití univerzálních a jednoduchých zkušebních zařízení
- uniformita těles pro všechny určované vlastnosti materiálů
- nízká aktivita ozářených těles
- výběr zkušebních těles z lokalizovaných oblastí a možnost určit lokální mechanické vlastnosti

Přes intenzivní výzkum v této oblasti stále neexistuje univerzální metoda, pomocí níž by bylo možno, po provedení SPT na neznámém materiálu, z naměřených dat přímo vyhodnotit hodnoty materiálových vlastností, které by se na stejném materiálu naměřily na konvenčních (standardizovaných) tělesech. Nalezení obecně platných korelací mezi zkouškami SPT a „klasickými“ mechanickými postupy zkoušení není dosud dostatečně prozkoumáno a ověřeno. Náročná na přípravu je také výroba zkušebních těles, neboť při ní nesmí dojít k ovlivnění materiálu a je zde požadavek na velkou rozměrovou přesnost zkušebního disku.

6.2.3. Princip a postup zkoušení

Princip SPT je vtlačování kuličky (popř. razníku s hemisférickou plochou) do plochého zkušebního tělesa ve tvaru disku, který je uchycen mezi horním přidržovačem a dolní maticí. Rychlost posuvu pístu je během celé zkoušky konstantní a zaznamenává se síla a deformace (posuv zatěžující síly). Příklad použitého přípravku navrženého dle CWA 15627 je znázorněn na **Obr. 37** a uspořádání zkoušky je vyobrazeno na **Obr. 38**. Charakteristické rozměry přípravku a zkušebního tělesa jsou uvedeny v Tab. 2.



Obr. 37 Přípravek pro zkoušky SPT [33]

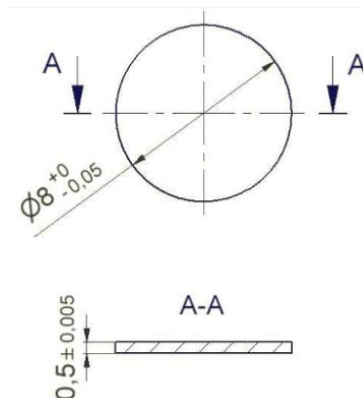
Tab. 2 Charakteristické rozměry přípravku a zkušebního disku pro zkoušky SPT

h_0	D	R	r	d
0,5	8,0	1,25	0,5	4,0



Obr. 38 Příklad uspořádání SPT [33]

Doporučená geometrie zkušebních těles (disků) je uvedena na obrázku **Obr. 39**. Zkušební disky je možno vyrábět ze standardních testovacích materiálů, např. z válcovaných polotovarů či tyčí. Pro výzkumné účely je výhodné z daného materiálu vyrobít tyčinku o průměru 8 mm a z ní pak s přídatkem nařezat požadovaná tělesa. Minimální doporučený přídatek je $1,1 * h_0$.



Obr. 39 Zkušební disk používaný pro zkoušky SPT

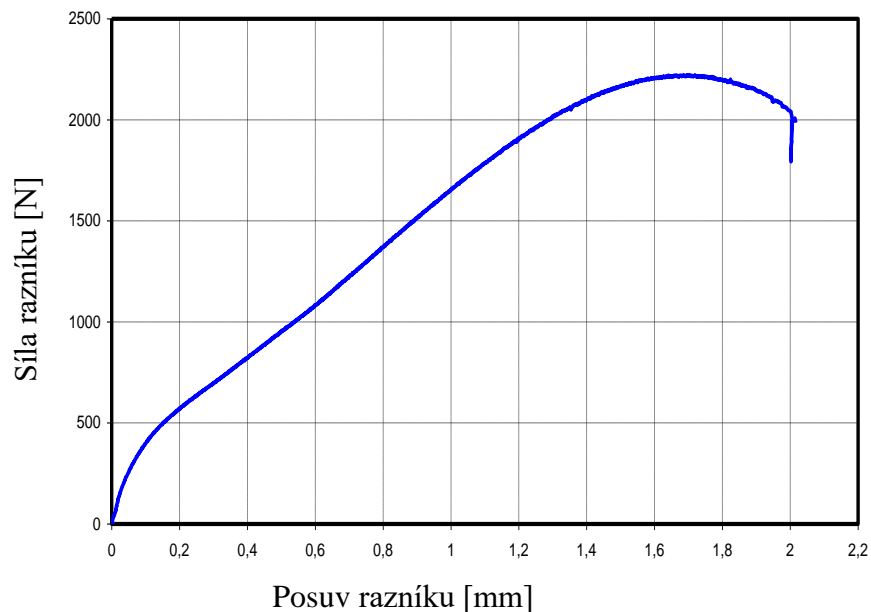
Další možností výroby je odebrání materiálu přímo z komponent strojních zařízení, např. z parovodů nebo turbín.

Finální úprava zkušebního disku se pak provádí broušením na metalografické brusce s dokončovacím brusným papírem P1200. Konečná tloušťka musí být v toleranci $\pm 1\% h_0$. Tolerance rozměrů mají být měřeny ve čtyřech místech po obvodu po 90° a ve středu disku. Průměr disku se měří ve dvou pozicích po 90° .

Zkušební disk, který odpovídá výrobním tolerancím, se vloží do zkušebního přípravku, přítlačná síla v přípravku není v dokumentu CWA 15627 jednoznačně definována, avšak na výslednou

křivku může mít vliv. Tento problém lze vyřešit např. použitím momentového klíče při utahování a tím zajistit stejný přítlak pro všechny prováděné testy.

Rychlost zatěžování (tj. rychlost posuvu pístu) je doporučena v rozmezí 0,2-2 mm/min. V praxi se často užívá rychlost 0,5 mm/min. Při samotné zkoušce se pak počítačově zaznamenává posuv měřený extenzometrem nebo pístem a síla. Příklad takového záznamu je znázorněn na **Obr. 40**.

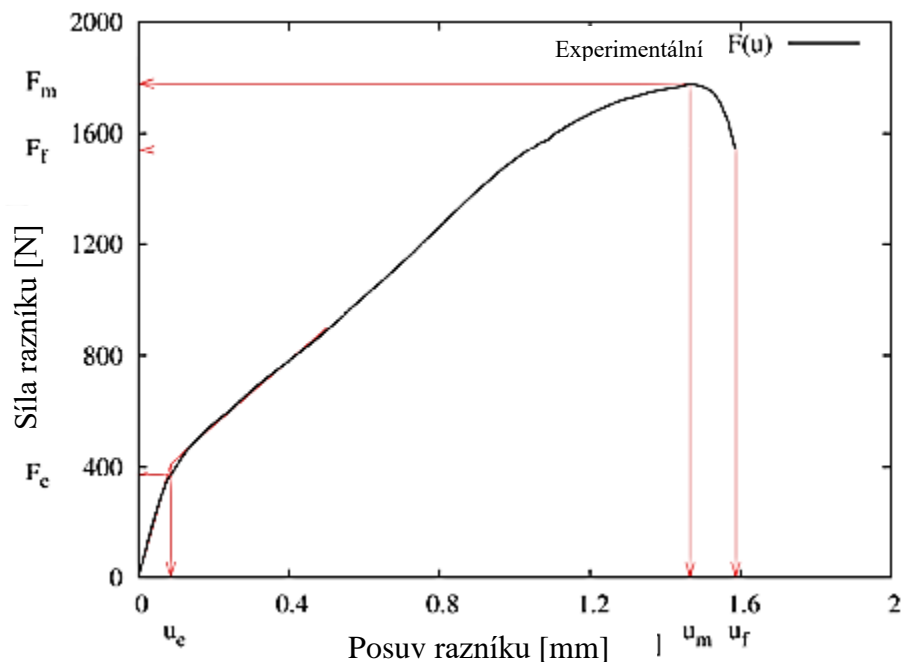


Obr. 40 Příklad záznamu SPT pro nízkouhlíkovou ocel [39]

6.2.4. Vyhodnocení zkoušky SPT

Cíl SPT je získání křivky, která nese informaci o elasto-plastické deformaci a pevnostních charakteristikách materiálu. Pro vyhodnocení konvenčních mechanických charakteristik (tahových vlastností, přechodové křivky mezi houževnatým a křehkým lomem a lomové houževnatosti) jsou ze získaného záznamu, viz **Obr. 41** vyhodnocovány následující charakteristiky:

- maximální zaznamenaná síla během SPT
- síla charakterizující přechod z lineárního stavu do stádia spojovaného s rozvojem plastické deformace přes tloušťku zkušebního disku
- deformace při maximální síle
- deformace odpovídající porušení zkušebního disku
- lomová energie získaná z plochy pod křivkou až do porušení zkušebního disku



Obr. 41 Charakteristický záznam pro SPT s vyznačenými body pro vyhodnocení [8]

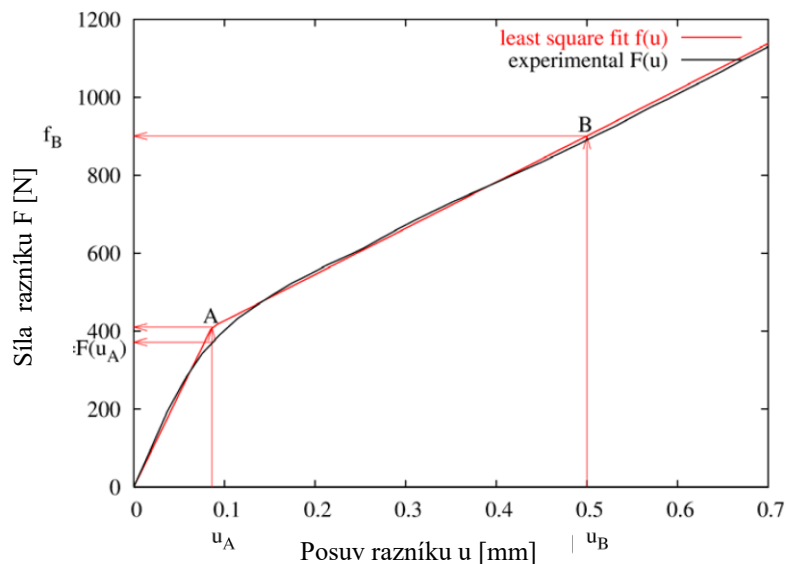
Vyhodnocení přechodu z lineárního stavu do plastického stavu:

Hodnotu F_e charakterizující přechod z lineárního stavu do plastického stavu je možno korelovat s mezí kluzu $R_e/R_{p0,2}$ získanou ze zkoušky tahem a proto bude věnována zvláštní pozornost metodě určující tuto hodnotu. Dokument CWA 15627 určuje proceduru, jak přechodovou sílu F_e získat. Ze závislosti síla-posunutí obdržíme křivku $F(u)$, viz **Obr. 42**. Bilineární funkce $f(u)$ z originální funkce je mezi body A a B definována vztahem (19). Pro minimalizaci odchylky je pak použit vztah (20).

$$f(u) = \begin{cases} \frac{f_A}{u_A} u & \text{pro } 0 \leq u < u_A \\ \frac{f_B - f_A}{u_B - u_A} (u - u_A) + f_A & \text{pro } u_A \leq u \leq u_B \end{cases} \quad (19)$$

$$err = \int_0^{u_B} [F(u) - f(u)]^2 du \quad (20)$$

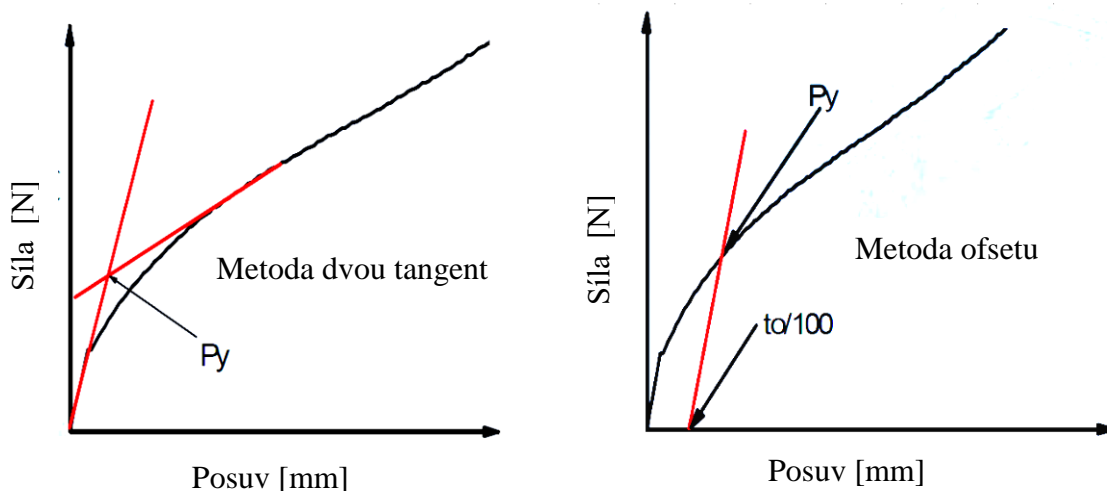
Proměnné f_A , u_A a f_B jsou stanoveny regresní analýzou pro maximální hodnotu korelačního koeficientu funkce $F(u)$. Pak se hodnota F_e určí jako síla na experimentální křivce $F(u)$ v bodě A, tedy $F_e = F(u_A)$. Jediným volným parametrem při této optimalizaci zůstává bod u_B , jehož doporučená hodnota je v intervalu 0,3 až 0,5 mm.



Obr. 42 Experimentální křivka $F(u)$ a proložená bilineární funkce $f(u)$ [8]

Při praktickém vyhodnocení lze tento proces zjednodušit proložením dvou tečen. Průsečík těchto přímek pak udává polohu na vodorovné ose u_A a hodnota síly na křivce $F(u)$ odpovídající bodu posunutí u_A je hodnotou F_e .

Na tomto místě je nutno podotknout, že v mnoha odborných člancích (např.[33], [40]) se setkáváme s vyhodnocením bodu F_e jako hodnotou v průsečíku obou tečen, viz **Obr. 41**, místo značení F_e je zde použito P_y) nebo jako průsečík počáteční přímky ofsetovaný o hodnotu $h_0/100$ (zde je tloušťka disku označena t_0). Tento přístup může znamenat rozdíl hodnot v řádu několik desítek N.



Obr. 43 Alternativní přístup vyhodnocení F_e [40]

6.2.5. Vyhodnocení lomové energie při SPT

Lomová energie SPT slouží např. k vyhodnocení lomové houževnatosti nebo k určení přechodové teploty.

Lomová energie je definována vztahem (22) jako plocha pod křivkou síla – posunutí až do bodu začátku vzniku trhliny u_f , který je definován jako posunutí, kde síla při SPT poklesne o 20% vůči maximální síle, viz rovnice (23).

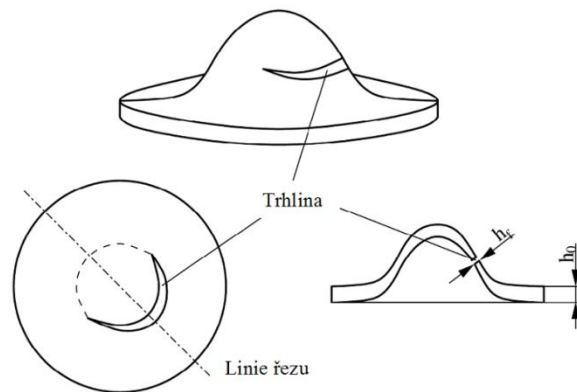
$$E^{SP} = \int_0^{u_f} F(u) du \quad (21)$$

$$F_f = 0,8 * F_m \quad (22)$$

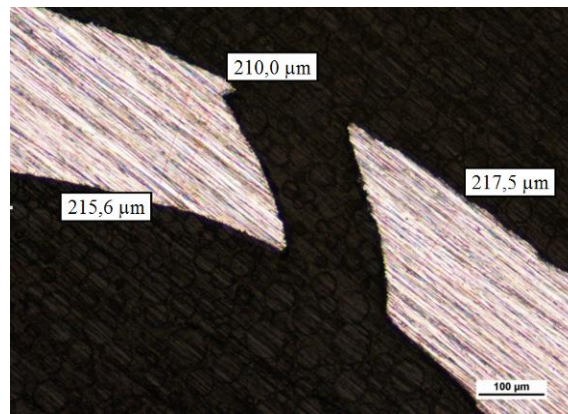
6.2.6. Vyhodnocení efektivní lomové deformace

Efektivní lomová deformace ε_f (effective fracture strain) je dle CWA 15627 [8] definována vztahem (24). Detaily měření h_f jsou patrné z Obr. 44. Nejdříve je nutné identifikovat iniciaci trhliny a v tomto místě vést řez procházející osou zkušebního disku. V praxi to lze udělat tak, že zkušební disk zalijeme do akrylátové hmoty a od kraje disku odbrousíme pomocí metalografické brusky 4 mm. Pomocí optického mikroskopu lze pak tloušťku h_f snadno změřit, viz Obr. 45.

$$\varepsilon_f = \ln \left(\frac{h_0}{h_f} \right) \quad (23)$$



Obr. 44 Schéma postupu měření nejmenší tloušťky po zkoušce SPT [8]

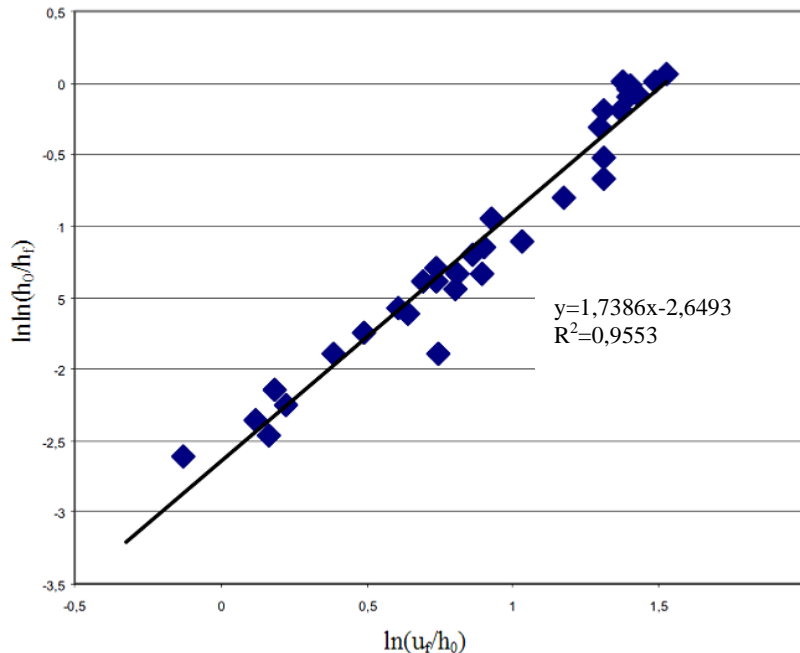


Obr. 45 Vzorek z materiálu 16 363 porušený při pokojové teplotě [4]

Alternativním způsobem určení efektivní lomové deformace je její vyhodnocení přímo z grafu. Tuto závislost určuje vztah (24). Hodnoty empiricky určených konstant β_{SP} a x_{SP} jsou v některých člancích vyčísleny hodnotami $\beta_{SP} = 0,5$, $x_{SP} = 0,15$ [41][43].

$$\varepsilon_f = \beta_{SP} * \left(\frac{u_f}{h_0} \right)^{x_{SP}} \quad (24)$$

Jak lze usuzovat z obrázku 46, na kterém je ukázána regresní závislost mezi $\ln \ln(h_0/h_f)$ a $\ln(u_f/h_0)$ měřeními v teplotním intervalu od -193°C do pokojové teploty, je shoda měření pro oba způsoby velmi dobrá. Evidentní výhodou metody používající vyhodnocení ze záznamu je její menší pracnost a možnost automatického vyhodnocení zkoušky.



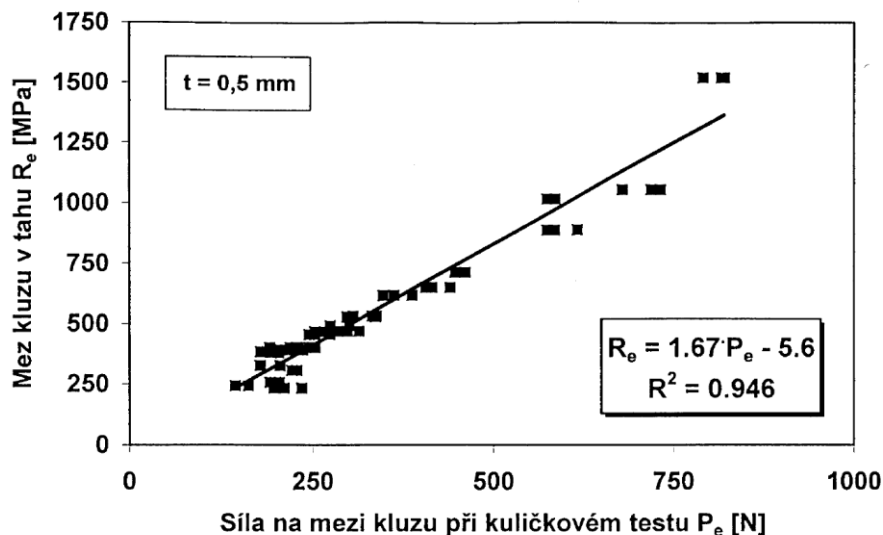
Obr. 46 Vztah mezi $\ln \ln(h_0/h_f)$ a $\ln(u_f/h_0)$ pro rotorovou CrMoV ocel [44]

6.2.7. Stanovení meze pevnosti a meze kluzu na základě výsledků SPT

Získané hodnoty ze SPT, F_m a F_e , lze empiricky korelovat na mez kluzu $R_e/R_{p0,2}$ a mez pevnosti R_m . Získané závislosti stanovené pro konkrétní zkušební zařízení představují pro stejné tloušťky disků lineární závislost mezi hodnotami SPT a standardních testů a v mnoha pracích se předpokládá, že jsou nezávislé na typu a struktuře, resp. pevnostním stavu testované oceli nebo slitiny [45][46]. Často se v literatuře vyskytují vztahy, které vkládají mezi F_m vs. R_m a F_e vs. $R_e/R_{p0,2}$ lineární závislost. Příklady těchto vztahů jsou uvedeny v rovnicích (25) a (26). Na **Obr. 47** je grafické znázornění této závislosti.

$$R_e [\text{MPa}] = 5,98 \cdot F_e [\text{N}] \quad [60] \quad (25)$$

$$R_m [\text{MPa}] = 0,184 \cdot F_m [\text{N}] \quad [61] \quad (26)$$



Obr. 47 Korelace mezi mezí kluzu a zatížením F_e u SPT [40]

Možnou modifikací těchto metod je korelace meze pevnosti R_m a meze kluzu R_e s normalizovanými hodnotami, tedy porovnání R_e s F_e/h_0 a R_m s F_m/h_0^2 nebo $F_m/(u_m \cdot h_0)$. Rovnice (27) – (30) představují příklady obdržných korelací pro různé oceli.

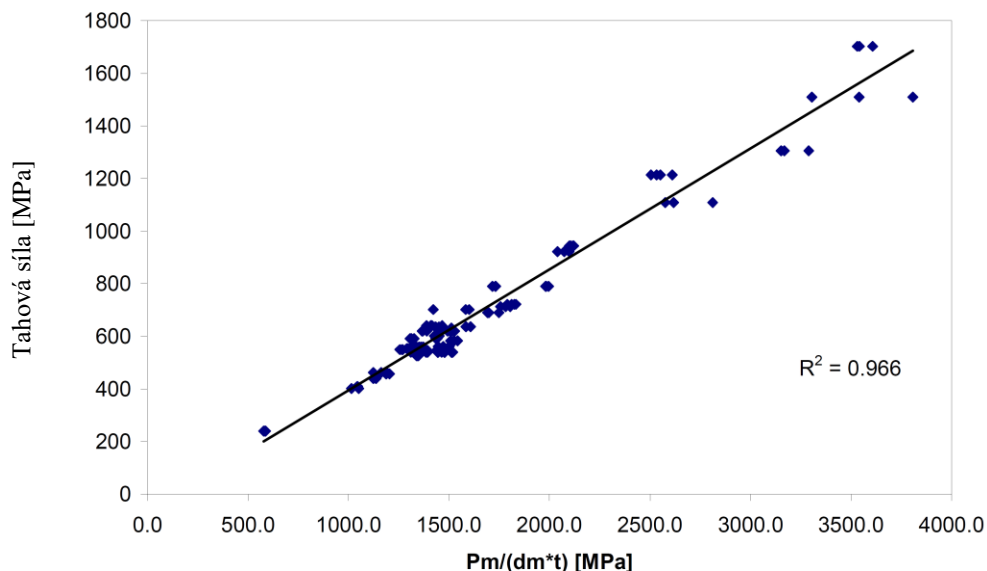
$$R_e [MPa] = 0,36 \left(\frac{F_e}{h_0^2} \right) \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad [62] \quad (27)$$

$$R_e [MPa] = 413 \left(\frac{F_e}{h_0^2} \right) \left[\frac{kN}{mm^2} \right] + 149 \quad [63] \quad (28)$$

$$R_m [MPa] = 77 \left(\frac{F_m}{h_0^2} \right) \left[\frac{kN}{mm^2} \right] + 218 \quad [63] \quad (29)$$

$$R_m [MPa] = 0,496 \left(\frac{F_m}{h_0 \cdot u_m} \right) \left[\frac{kN}{mm^2} \right] - 94 \quad [2] \quad (30)$$

Pokusy provedené ve firmě COMTES FHT a.s. ukazují, že typová korelace (29), zahrnující také deformaci při maximální síle u_m , nejlépe koreluje výsledky ze SPT pro široké rozmezí materiálů a pevnostních hodnot. Na **Obr. 48** je grafické znázornění tohoto typu korelace, tj. závislosti meze pevnosti na normalizované maximální síle při SPT.



Obr. 48 Korelace meze pevnosti na normalizované maximální síle při SPT [47]

6.2.8. Určení přechodové teploty na základě výsledků SPT

Přechodovou teplotu mezi křehkým a houževnatým lomem můžeme u ocelí získat z výsledků teplotní závislosti SP energie. V řadě prací [33][39][48][49][50] je tato teplota korelována na přechodovou teplotu $FATT_{50}$.

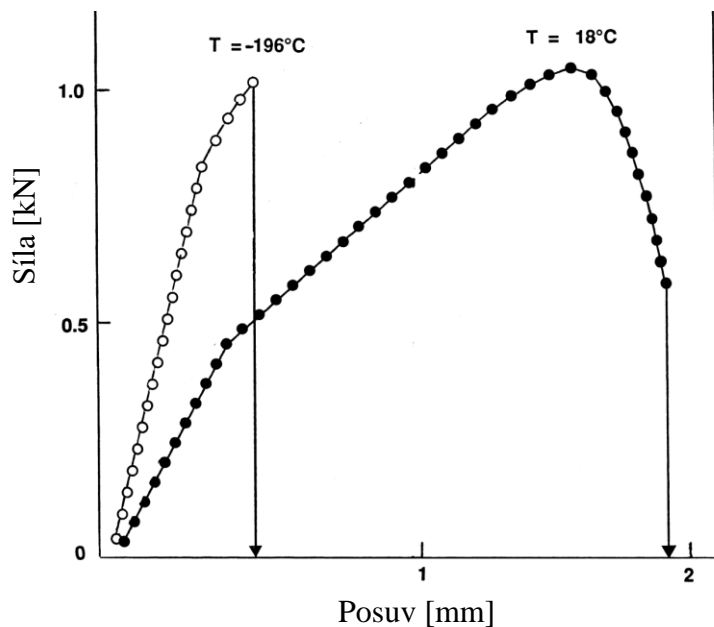
SP energie je definována jako energie potřebná pro porušení zkušebních disků. Při určité teplotě vykazují hodnoty energie E^{SP} a síly F_m náhlý pokles. Předpokládá se, že tato teplota koresponduje s bodem, kde se vyskytuje tranzitní chování. Přechodová teplota z SPT je definována rovnicí (31), tedy jako teplota odpovídající průměru maximální a minimální lomové energie při SPT.

$$T_{SP} \approx \frac{E_{\max}^{SP} + E_{\min}^{SP}}{2} \quad (31)$$

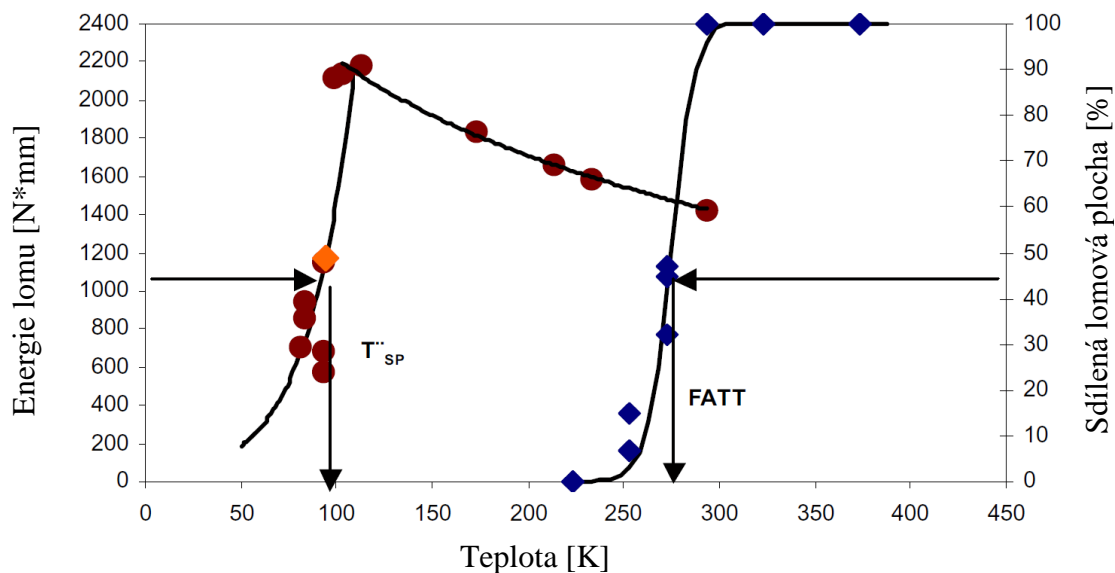
Minimální energie se může určit jako minimální energie naměřená během testování, energie získaná extrapolací křivky pro teplotu 50K [39] nebo jako energie o velikosti 200J [33][50]. Tranzitní teplota T_{SP} získaná ze SPT může být korelována s teplotou DBDT (Ductile Brittle Transition Temperature) získanou měřením lomových ploch ($FATT_{50}$) dle vztahu (32) je v rozmezí 0,35-0,45. Koefficient α_{SPT} je ale materiálově závislý a např. v práci [51] byla jeho hodnota pro ocel X20CrMoV 11-1 stanovena na 0,539.

$$T_{SP} = \alpha_{SPT} * DBTT_{Charpy} \quad (32)$$

Příklad odlišného chování ocele při SPT v závislosti na teplotě je znázorněno na **Obr. 49**. Příklad možného posunu tranzitní teploty pro ocel vyhodnocené ze SPT a ze standardních Charpy těles užitím metody *FATT*₅₀ je znázorněn na **Obr. 50**.



Obr. 49 Příklad chování materiálu při SPT za různých teplot [52]

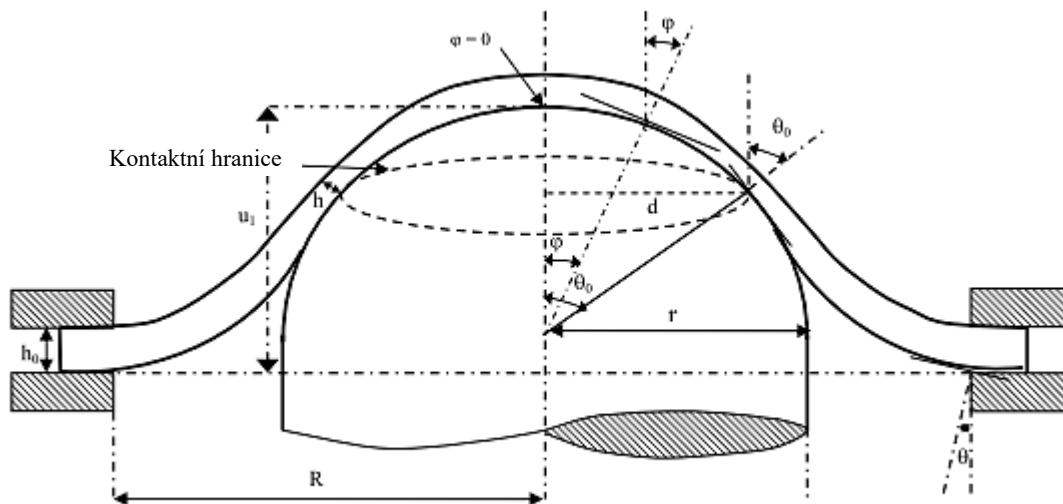


Obr. 50 Posun tranzitní teploty pro ocel vyhodnocené ze SPT a ze standardních Charpy těles 10x10x55 mm užitím metody *FATT*₅₀ [44]

6.3. Zkoušky tečení pomocí SPT

Principem Small Punch Creep Testu je opět vtlačování kuličky do zkušebního tělesa ve tvaru disku, který je uchycen mezi horním přidržovačem a dolní matricí, přípravek je umístěn v peci zajišťující danou teplotu. Zatížení je během celé zkoušky konstantní a zaznamenává se závislost deformace na čase.

Pro porovnávání výsledků creepových SPT a klasických zkoušek tečením bylo navrženo několik modelů, z nichž není většina jednoduše aplikovatelná, protože jednak definice ekvivalentního napětí při SP zkoušce by vyžadovala podrobnou matematickou analýzu, chybí znalost několika ne zcela jednoduše dostupných materiálových parametrů Monkman-Grantovy konstanty, Nortonovy parametry, tažnost, creepová data při konstantním zatížení. Existují i relativně jednoduché vztahy, u nichž ekvivalence napětí je založena na stanovení obvodového membránového napětí, které způsobí porušení SP disku, [55]. Příslušné geometrické veličiny jsou definovány na **Obr. 51**.



Obr. 51 Definice geometrických parametrů [55], [56]

F – použitá síla na SP vzorek

σ – napětí při SP creep testu

h – tloušťka vzorku v místě trhliny

φ – úhel mezi povrchovou normálou a vertikální osou

h₀ – původní tloušťka disku

θ_0 – úhel φ v místě trhliny ($\theta_0 = \varphi_{\max}$)

R – poloměr otvoru v disku

θ – úhel φ , kde $d = R$

r – poloměr vtláčovací kuličky

u_1 – posunutí razidla ($\varphi = 0$)

d – poloměr vzorku v místě trhliny

Vzájemné vztahy mezi **F** a **σ** při SP creep jsou následující

- a) Vztah, který navrhl Bicego [55] v rámci evropského projektu COPERNICUS, zabývající se metodou SP Test

$$\frac{F}{\sigma} = [2\pi h(r + h/2)\sin\theta_0]\sin\theta_0 \quad (33)$$

Na základě testů prováděných na oceli X20 bylo stanoveno $F/\sigma = 1,876$

- b) Formulace podle Dobeše a Miličky [77]:

$$\frac{F}{\sigma} = \frac{[2\pi hr \cdot \tan\varphi]}{[1 + \tan^2\varphi]^{1/2}} \quad (34)$$

Jestliže je příslušný tlak vyhodnocen v bodě ohybu vzorku tak jako v předcházejícím modelu, lze vzorec zjednodušit na tvar:

$$\frac{F}{\sigma} = \frac{[2\pi hr \cdot \sin\theta_0 \cdot \tan\theta_0]}{[1 + \tan^2\theta_0]^{1/2}} \quad (35)$$

- c) Rovnice navržená podle Charbartyho [55]:

$$\frac{F}{\sigma} = 2\pi h_0 \cdot r \cdot \sin^2\theta_0 \cdot \left\{ \frac{1 + \cos\theta_0}{1 + \cos\theta} \right\}^2 \quad (36)$$

- d) Formulace podle Tettamantiho a Crudeliho [3]:

$$\frac{F}{\sigma} = K \cdot \left[2\pi hr \cdot \left(\frac{D}{2R} - \kappa \right) \right] \quad (37)$$

D- průměr otvoru, který je rovný 2R (obvykle 4mm)

K- koeficient upevnění (0,5 pro vzorek neupevněný na okraji, 0,6-0,8 pro vzorek upevněný)

κ - koeficient tření (0,6-0,8 v závislosti na teplotě a zátěži)

Navrhovaná varianta v případě upevněného vzorku $F/\sigma = 1,95 \sim 2,06$, v případě neupevněného vzorku: $F/\sigma = 2$

- e) nejnovější formulace z výzkumného ústavu v Rossendorfu v Německu [55]:

$$\frac{F}{\sigma} = 3.33k_{SP}R^{-0,2}r^{1,2}h_0 \quad (38)$$

7. Experimentální část

Experimentální část dizertační zprávy navazuje na část teoretickou, ze které bude čerpat a odkazovat se na uvedené vztahy. V experimentální části jsou popsány vybrané jednotlivé zkoušky mechanických vlastností materiálu, na základě kterých je možno diskutovat o použitelnosti miniaturních těles pro hodnocení materiálových charakteristik, nebo pro hodnocení zbytkové životnosti provozovaných komponent. V této části práce je popsán použitý experimentální materiál. Pro dosažení cílů disertační práce bylo testováno celkem pět materiálů, u kterých byly provedeny jak zkoušky na klasických zkušebních tělesech, tak zkoušky na mini vzorcích. Kvůli velké časové i finanční náročnosti jednotlivých zkoušek nebylo možno pro každý materiál provést všechny druhy zkoušek, i když by to bylo pro vzájemné porovnání ideální.

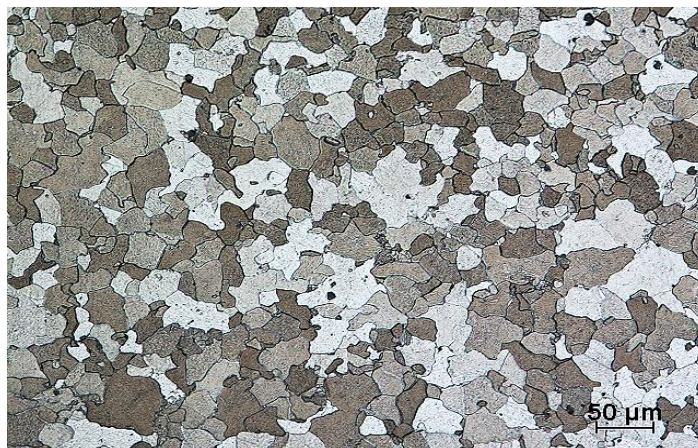
7.1. Ocel ČSN 415128

První materiál je ocel pro energetická zařízení, jako jsou parovody a přehřívákové trubky. Tento materiál byl odebrán z ohybu parovodu po provozu a zastupuje tu část použití mechanických zkoušek, které jsou potřebné pro stanovení zbytkové životnosti na provozovaných součástech v energetice, tedy v určitém stupni degradace materiálu. Parametry parovodu byly:

Parovod:	TR KR 324 x 48 mm
Provozní teplota:	540 °C
Provozní tlak:	18 MPa
Provozní hodiny:	cca 185 000 hodin
Poloměr ohybu:	1200 mm

Na vzorcích odebraných z ohybu parovodu byl proveden metalografický rozbor. Bylo použito zkušební zařízení: laboratorní metalografický mikroskop NIKON Epiphot 300. Vzorky byly nejprve přebroušeny na metalografické brusce pod vodou za pomoci stále jemnějších brusných papírů (při změně zrnitosti byl vzorek pootočen o 90°) a poté leštěny na metalografické leštičce za přítomnosti leštící pasty. Výbrus byl pak pro zviditelnění struktury naleptán v činidle Nital a pozorován Laboratorním mikroskopem Nikon Epiphot 300 při zvětšeních 200x a 500x.

Závěrem lze konstatovat, že stav mikrostruktury ve vybraných místech ohybu odpovídá použitému materiálu a aplikovanému režimu tepelného zpracování. Mikrostruktura vnějšího a vnitřního povrchu se výrazně neliší, mikrostruktura vnitřního povrchu je mírně jemnější než na vnějším povrchu, je tvořena feritem a bainitem karbidy jsou částečně rozpadlé. Lze říci, že mikrostruktura vnitřního povrchu je mírně jemnější než na vnějším povrchu. Co se týče degradace materiálu vlivem dlouhodobého provozu za vysokých teplot, lze jej ohodnotit stupněm 2a až 2b dle předpisu VGB – TW 507, což představuje výskyt doposud jednotlivých izolovaných kavit, které zatím nemají žádnou orientaci ani znaky spojitých formací. Tento stav mikrostruktury koresponduje s počtem provozních hodin. Příklad mikrostruktury je uveden na **Obr. 52**.



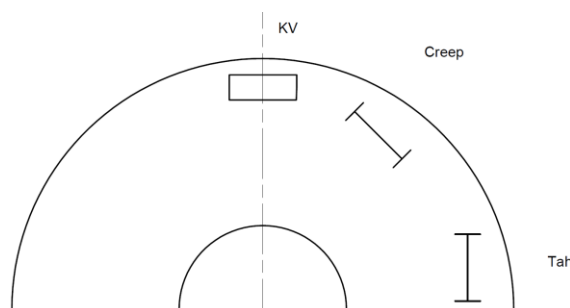
Obr. 52 Příklad mikrostruktury parovodu [33]

Na **Obr. 52** je mikrostruktura feritická s rozpadlými karbidy. Hrubší zrno s místním vyloučením karbidické fáze po hranicích zrn. Výskyt projevů četnějšího kavitace poškození dle VGB – TW 507 jej lze hodnotit stupněm 2b. Velikost zrna dle ČSN EN ISO 643 je stupeň 8. V tabulce **Tab. 3** je uveden chemický rozbor materiálu parovodu a jeho porovnání s chemickým složením dle normy ČSN 41 5128 [64].

Tab. 3 Chemické složení parovodu

	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Al celk	P	S
ČSN 41 5128 [%]	0,10-0,18	0,45 - 0,70	0,15 - 0,40	0,50 - 0,75	0,40 - 0,60	0,22 - 0,35	max 0,025	max 0,040	max 0,040
Skutečné chem. složení [%]	0,14	0,52	0,36	0,69	0,48	0,27	0,019	0,019	0,017

Všechny polotovary na zkušební tělesa byly odebrány v tangenciálním směru, viz **Obr. 53**.



Obr. 53 Náčrt umístění zkušebních tyčí pro tah, creep a KV

7.2. Ocel na odlitky 42 2747

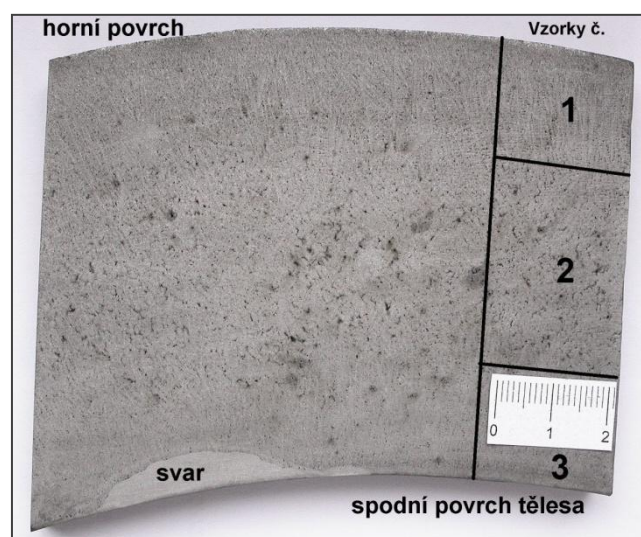
Druhým materiálem je také materiál po provozu, ale jedná se o litý materiál. Vnitřní těleso skříně bylo vyrobeno z materiálu ocel na odlitky 42 2747, Cr-Mo-V, specifikace dle ŠN 42 2747. Byl proveden rozbor chemického složení svršku i spodku tělesa včetně doprovodných prvků. Výsledky jsou uvedeny v tabulce **Tab. 4** v porovnání s chemickým složením dle ŠN 42 2747 [78].

Tab. 4 Chemické složení vršku i spodku tělesa

	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Ni	Al	S.	P	Cu
Skutečné chem. složení-vršek [%]	0,22	0,75	0,49	1,35	0,98	0,30	0,06	0,057	0,020	0,017	0,13
Skutečné chem. Složení-spodek [%]	0,18	0,73	0,40	1,33	0,95	0,28	0,06	0,049	0,013	0,017	0,14
ŠN 42 2747 [%]	0,15 0,20	0,50 0,80	0,30 0,50	1,2 1,5	0,90 1,10	0,20 0,30	max 0,60	max 0,004	max 0,030	max 0,030	

Byl proveden metalografický rozbor příčného řezu z tělesa skříně z materiálu G17CrMoV 510 (42 2747). Pracovní teplota byla 530°C a těleso skříně bylo v provozu po dobu 160 000 hodin.

Nejprve byla na vybroušeném řezu provedena zkouška makrostruktury materiálu hlubokým leptáním dle ČSN 42 0467. Vzorek byl naleptán ve směsi HCl + H₂O za tepla a prohlédnut při zvětšení 10x. V litém materiálu se vyskytovaly řediny, jiné vady nebyly patrné, u spodního oblouku byl v jednom místě nalezen svar, viz **Obr. 54**.



Obr. 54 Makrostruktura řezu ze skříně tělesa [66]

Potom byly z této desky uříznuty tři vzorky pro metalografické hodnocení. V nenaleptaném stavu byly patrné vměstky typu sulfidů a oxidů Al a řediny. Teprve po naleptání v leptadle Nital bylo zřetelné, že na horním i spodním povrchu tělesa došlo k částečnému oduhličení povrchu s převažujícími zrnky feritu, celková hloubka oduhličení je na horním povrchu cca 3,8 mm (**Obr. 55**: Mikrostruktura vzorku č. 1), na spodním rovněž cca 3,8 mm. Z obou stran byly změřeny průběhy tvrdosti, výsledky jsou uvedeny v **Tab. 5**, vyjma místa těsně pod povrchem se potvrdila nižší tvrdost vlivem oduhličení. Tvrdost prostředního vzorku 2 byla HV0,5=186, 192 a 188.

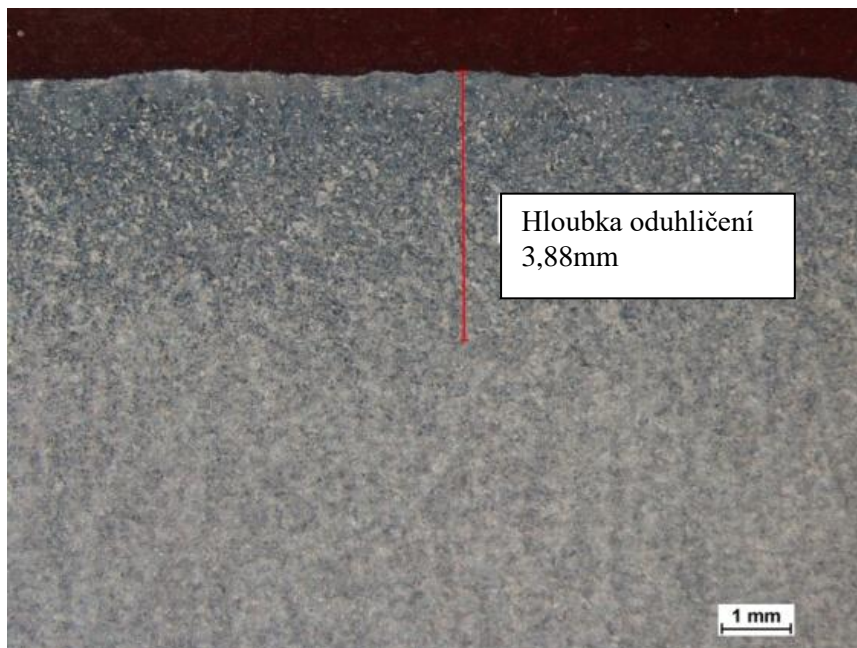
Tab. 5 Průběh tvrdosti HV0,5

Hloubka (mm)	0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7
Vzorek 1	184	145	166	163	170	173	176	176	180	180	180	178	186
Vzorek 3	190	163	164	164	168	171	178	178	176	182	186	188	186

Mikrostrukturu tvoří směs popuštěného bainitu s feritickými zrnky, která převažují, postupně se jejich množství směrem do hloubky snižuje a zvětšuje se podíl bainitu, až v hloubce cca 3,8 mm je struktura stejná jako uvnitř tělesa. Neovlivněná struktura v prostředním vzorku 2 je popuštěný bainit, místy jsou náznaky segregace, v kterých se soustřeďují malé sulfidy. Podle klasifikace strukturních změn vlivem dlouhodobého působení vysokých teplot dle POS-ZL/52/008, která vychází z mezinárodní Neubauerovy klasifikace, lze strukturu ohodnotit stupněm II., tj. počátek sferoidizace a precipitace jednotlivých izolovaných karbidů, zejména po hranicích zrn.

Při sledování povrchu tělesa a rozřezaných dílů bylo zjištěno, že zejména v podpovrchové vrstvě se lokálně vyskytují defekty. Jednalo se o větší bubliny a kulovité póry o velikosti jednotek milimetrů, které vystupují až na povrch a dále o nekovové exogenní vměstky. Ty mají nepravidelný tvar a velikost až přes 10 mm. Na sledovaných vzorcích se vyskytovaly do hloubky až 15 mm pod povrchem.

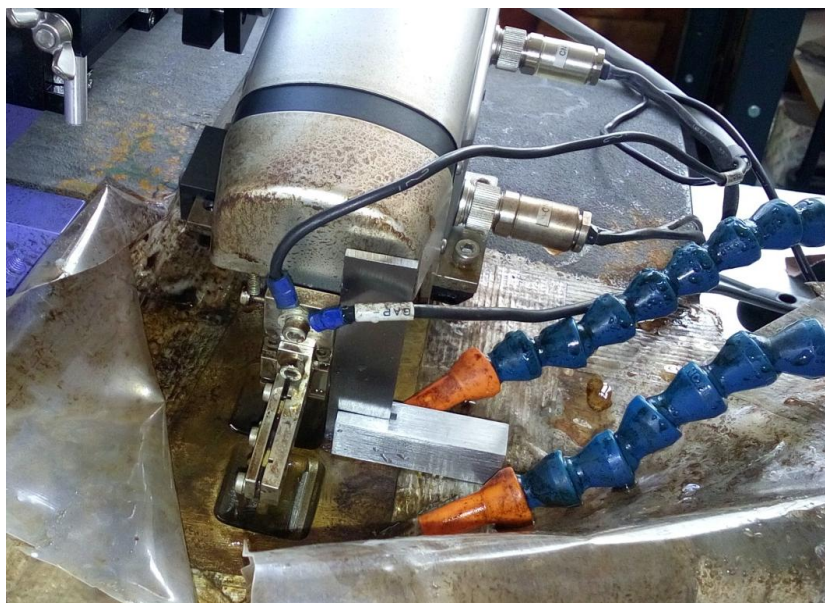
Nekovové vměstky jsou heterogenní a lze v nich pozorovat světle se jevící i tmavé útvary. U jednoho vměstku, byl proveden rozbor prvkového složení metodou elektronové energiově disperzní (ED) spektrometrie rtg záření. Vměstek je tvořen částicemi komplexních oxidů na bázi křemíku obsahující dále hořčík, vápník hliník, draslík, chróm a mangan a částicemi prakticky čistého SiO₂. Nejsvětlejší útvary jsou částice kovové matrice s oxidy různých prvků.



Obr. 55: Mikrostruktura vzorku č. 1

7.2 Metalografický rozbor odebraného vzorku

Pro zvládnutí metodiky odběru vzorků byl proveden semidestruktivní metodou pomocí EDSE odběrového zařízení zkušební odběr na tělese skříně (Obr. 56), na odebraném vzorku byl proveden metalografický rozbor.

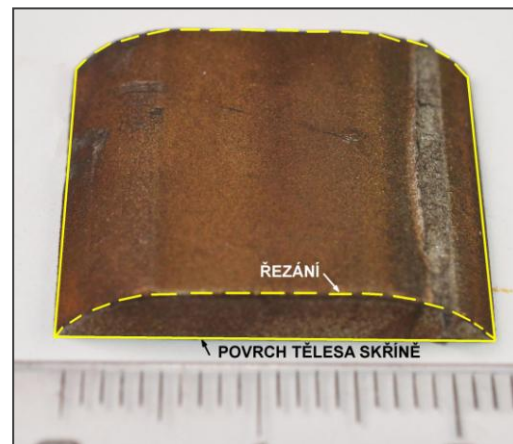
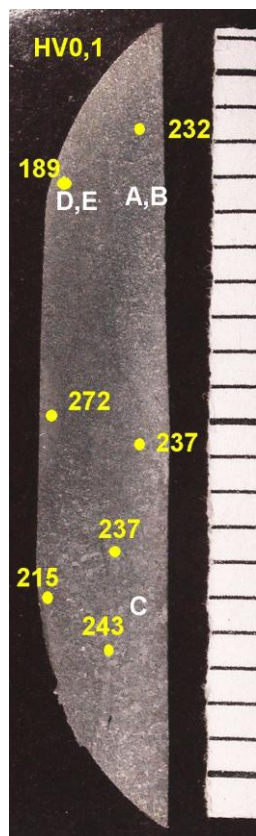


Obr. 56 Odběr vzorku odběrovým zařízením EDSE

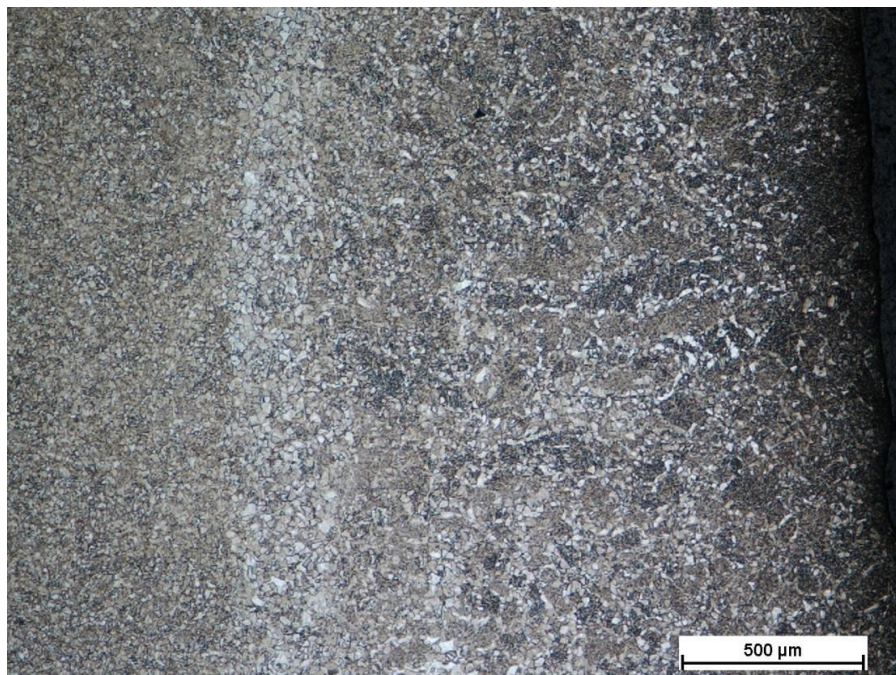
Odebraný vzorek boat sample je znázorněn na **Obr. 57**. Rovná strana je povrchem skříně tělesa, oblá strana je ta, která byla řezána při odběru vzorku. Tento vzorek byl pro hodnocení rozříznut a příčný řez byl připraven pro metalografický rozbor. Vzorek byl naleptán leptadlem Nital a změřena mikrotvrdość HV0,1 na mikrotvrdoměru LECO DM-400 A. Výsledky mikrotvrdości jsou v **Tab. 5** a odkazy na snímky mikrostruktury ze světelného metalografického mikroskopu NIKON Epiphot 300 jsou uvedeny na **Obr. 58** až **Obr. 62**.

V příčném řezu byla po celé ploše nerovnoměrná struktura. Podél dlouhého rovného okraje (tj. skutečném povrchu tělesa skříně) se ve struktuře vyskytoval bainit se zrny feritu, s mikrotvrdością 232 až 243 HV0,1. **Obr. 58**. Na opačném, zaobleném okraji se střední rovnou částí (tedy kde se odebíral boat sample řezáním) byla struktura převážně feritická, s menším množstvím bainitu mezi feritickými zrny, mikrotvrdość 215, 189 a 189 HV0,1, **Obr. 61**. V některých místech tato struktura zasahovala až do hloubky 2,2 mm, jinde méně, v nepravidelných tvarech. Přitom celková šířka vzorku je jen 3,8 mm. V jedné menší oblasti u oblé strany byla převážně bainitická struktura s tvrdostí HV0,1=272.

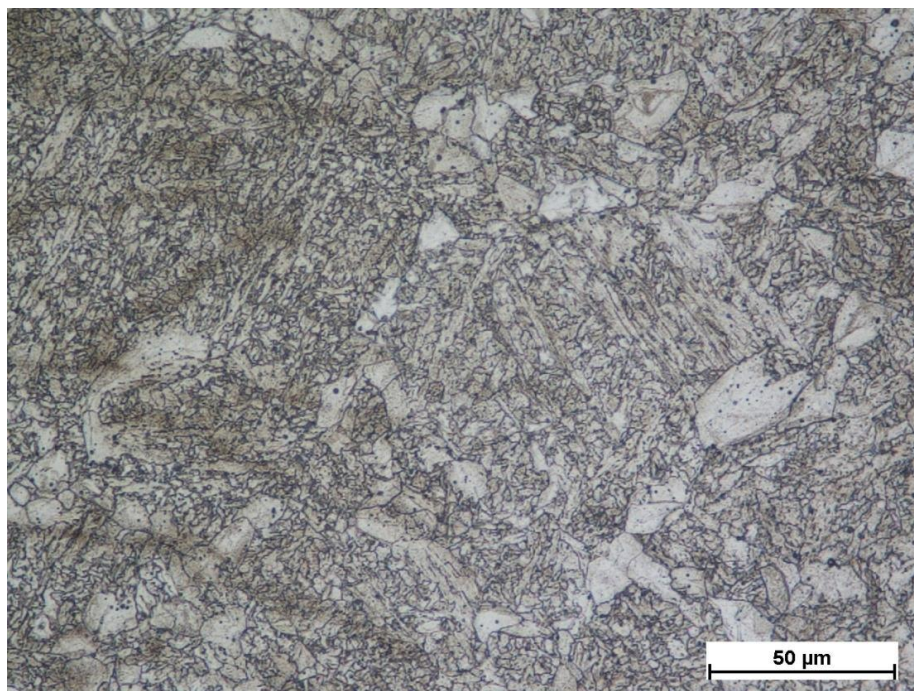
Při metalografickém rozboru celého průřezu skříně tělesa [66] bylo zjištěno, že od horního i spodního povrchu tělesa skříně došlo k částečnému oduhličení s převažujícími feritickými zrny s nižší tvrdostí až do hloubky 3,8 mm, což vysvětluje nerovnoměrnou strukturu zkoumaného boat sample. Zjištěné mikrotvrdości boat sample s nízkým zatížením HV0,1 vypovídají o tvrdosti jednotlivých strukturních fází, zatímco vyšší zatížení HV0,5 u hodnocení skříně tělesa odpovídá celkové tvrdosti.



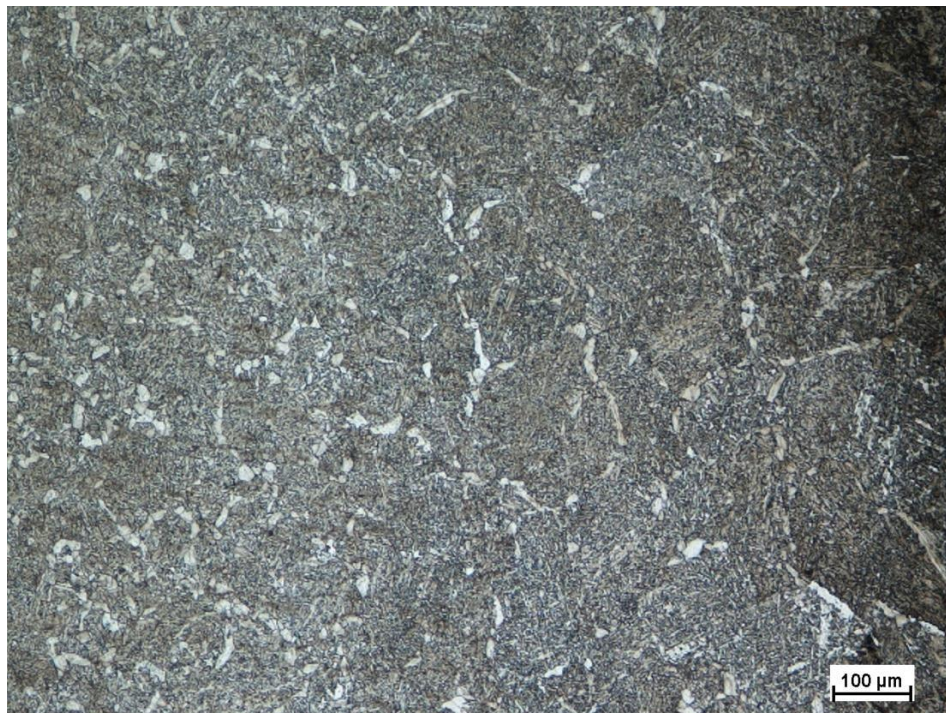
Obr. 57 Boat sample odebraný vzorek [66]



Obr. 58 Boat Sample, vpravo svisle rovný okraj, zv. 50x [66]



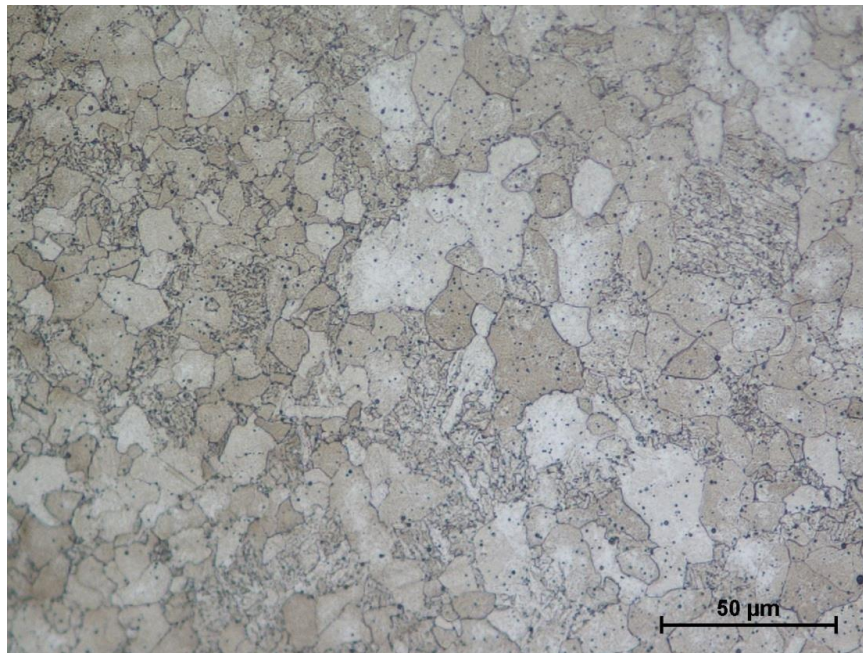
Obr. 59 Boat Sample, Detail z obr. 58, zv. 500x [66]



Obr. 60 Boat Sample, vpravo svisele je rovný okraj, zv. 100x [66]



Obr. 61 Boat Sample, vlevo svisele je zaoblený okraj, zv. 50x [66]



Obr. 62 Boat Sample, detail z levé části obr. 58, zv. 500x [66]

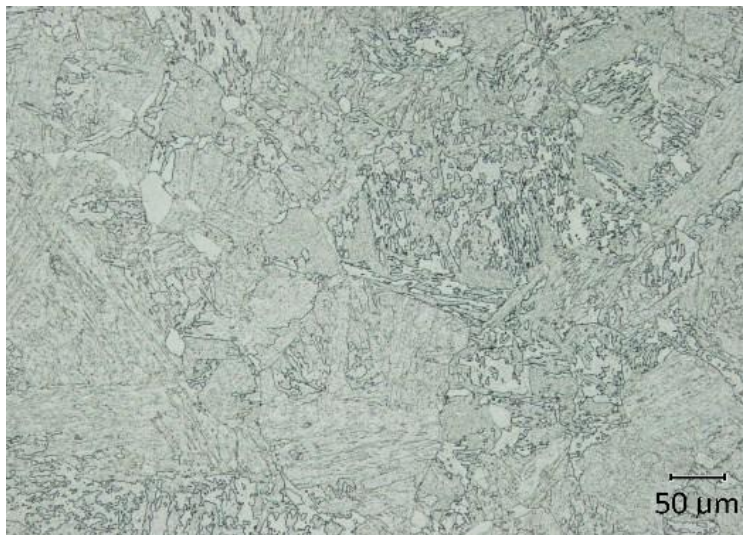
Závěrem lze konstatovat, že do budoucna je nutné pečlivě zvážit možnosti odběru zkušebních vzorků zejména u materiálu po provozu tak, aby výsledky mechanických vlastností nebyly ovlivněny povrchovou degradací.

7.3. Ocel 15Ch2NMFA

Třetím materiálem byla feritická nízkolegovaná ocel 15Ch2NMFA používaná pro tlakové nádoby reaktorů typu VVER. Hlavními požadavky na tuto ocel jsou svařitelnost silnostěnných komponent, strukturní stabilita, dobré pevnostní vlastnosti při provozních teplotách, odolnost proti porušení křehkým lomem a odolnost proti degradaci vlastností při radiačním ovlivnění [73]. Zkušební tyče z ocele 15Ch2NMFA byly vyrobeny ve firmě Škoda Plzeň a.s. Struktura byla tvořena jemným bainitem, **Obr. 63**, chemické složení je uvedeno v tabulce Tab. 6.

Tab. 6 Chemické složení materiálu 15Ch2NMFA

	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Ni	Co	S	P	Cu	As
Skutečné chem. složení	0,13	0,38	0,26	2,10	0,56	0,10	1,19	0,006	0,008	0,006	0,05	0,006
15Ch2NMFA	0,13 0,18	0,30 0,60	0,30 0,60	1,8 2,3	0,50 0,70	max 0,12	1,00 1,50	max 0,03	max 0,020	max 0,020	max 0,15	max 0,04



Obr. 63 Mikrostruktura materiálu 15Ch2NMFA

Vzorky byly vyrobeny z velkých rozřezaných nepoužitých těles CT50.

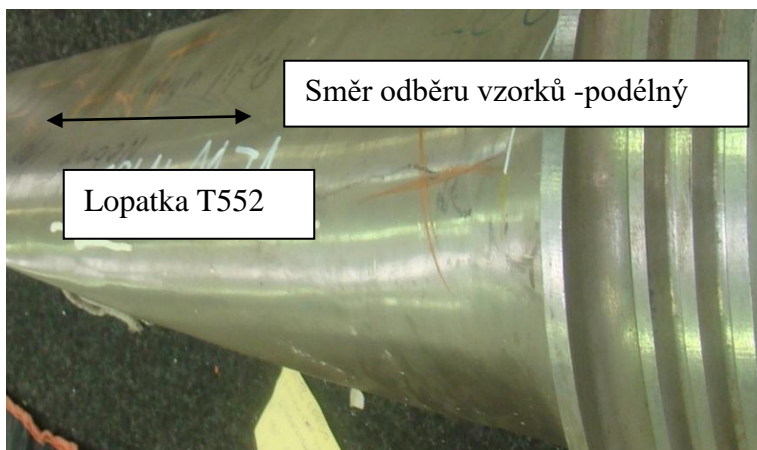
7.4. Ocel T552

Čtvrtým materiálem byla vysoce legovaná chromová ocel X12CrNiMoV12-3+QT s označením Böhler T552, 1.4938+QT, kovaná, určená pro výrobu výkovek pro oběžné lopatky parních turbín. Pro zkoušky byla dodána lopatka s označením NT3. Byl proveden rozbor chemického složení lopatky. Výsledky jsou uvedeny v **Tab. 7** v porovnání s chemickým složením dle specifikace Tp 0010M [67].

Tab. 7 Chemické složení materiálu lopatky

	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Ni	P	S	N
Dle specifikace [%]	0,08 - 0,15	0,50 - 0,90	max 0,35	11 - 12,50	1,5 - 2,00	0,25 - 0,40	2,00 - 3,00	max 0,020	max 0,015	0,020 - 0,040
Skutečné chem. složení [%]	0,13	0,79	0,19	11,66	1,65	0,36	2,73	0,016	0,0003	0,038

Vzorky byly odebrány v podélném směru lopatky postupně od nožky lopatky a dále do listu lopatky, viz **Obr. 64**. Byly provedeny zkoušky základních mechanických vlastností, jejich porovnání dle specifikace je uvedeno v tabulkách **Tab. 8** až **Tab. 10**.



Obr. 64 Směr odběru vzorků

Tab. 8 Výsledky zkoušky tahem dle ČSN EN ISO 6892-1

Vzorek	Templ.	R _{p0,2}	R _m	A	Z
	°C	MPa	MPa	%	%
NT 3_1	23	879	1030	18	59
NT 3_2	23	921	1019	18	63
NT 3_3	23	926	1021	18	62
Předpis	23	min 800	950-1070	min 14	informativně

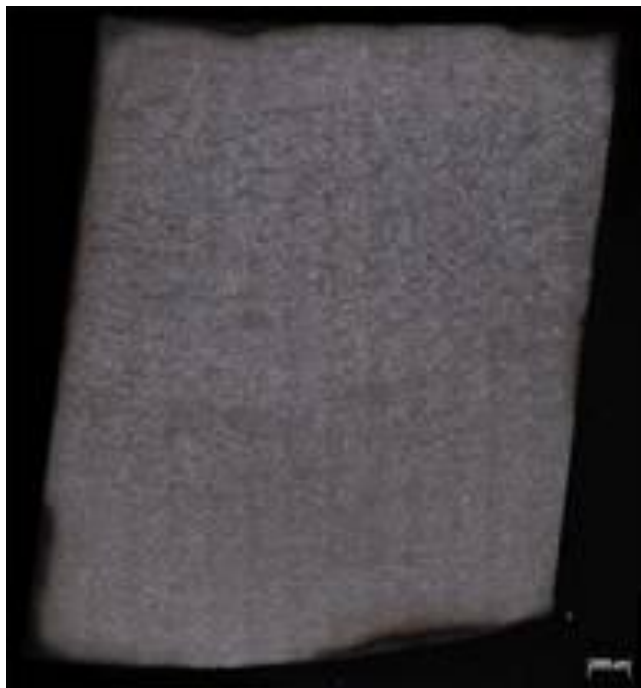
Tab. 9 Výsledky zkoušky rázem v ohybu dle ČSN ISO 148-1

Vzorek	Templ.	KV	KV	KV
	°C	J	J	J
NT 3_1	23	128	130	122
NT 3_2	23	130	126	134
NT 3_3	23	125	131	124
Předpis	23	min 55	min 55	min 55

Tab. 10 Výsledky měření tvrdosti dle ČSN EN ISO 6506-1

Vzorek	HBW	HBW
	30/3000	30/3000
NT 3_1	314	312
NT 3_2	318	316
NT 3_3	307	310
Předpis	292-330	

Na vzorku odebraného z listu lopatky byl proveden metalografický rozbor. Analyzovaný vzorek prošel standardní metalografickou přípravou. Mikrostruktura byla zdokumentována pomocí optického mikroskopu NIKON EPIPHOT 200, viz **Obr. 65**. Struktura byla tvořena jemnozrnným temperovaným martenzitem, vzorek neobsahoval žádný delta ferit a ve vzorku nebyly patrné žádné vměstky. Velikost zrna byla 5. Dále byla vyhodnocena mikročistota dle ASTM metodou A, viz **Tab. 8**.



Obr. 65 Mikrostruktura vzorku materiálu T552 (zvětšení 200x)

Tab. 11 Hodnoty mikročistoty dle ASME

Vzorek	Typ A		Typ B		Typ C		Typ D	
	Tenký	Silný	Tenký	Silný	Tenký	Silný	Tenký	Silný
NT3								
Průměr	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0

Jednalo se o novou lopatku bez známek provozní degradace.

7.5. Svarový spoj - návar

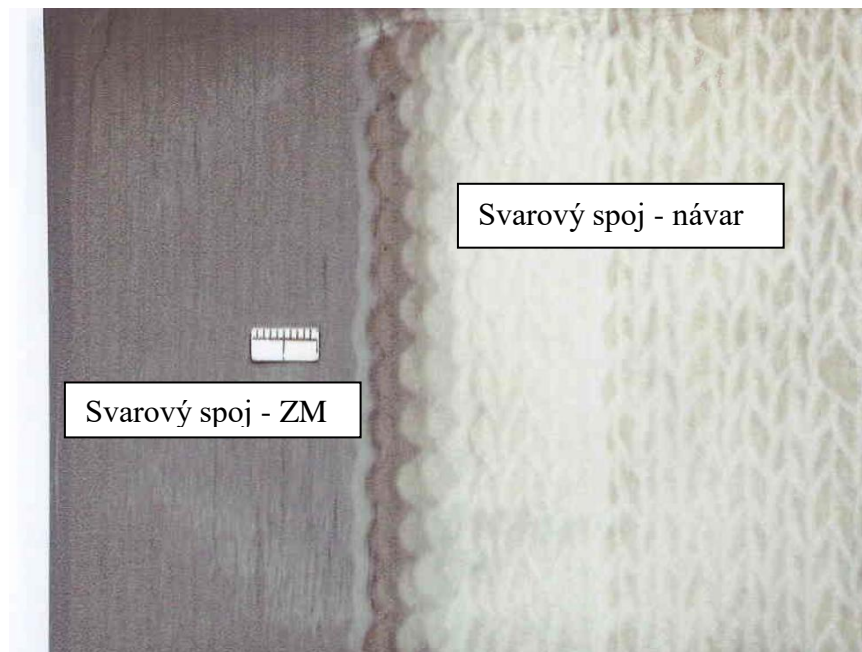
Pátým materiálem byl svarový spoj – návar. K výrobě svarového spoje byl použit základní materiál 28XCrMoNiV4-9 (16 536), materiál návaru byl Union S1. Svařování proběhlo metodou 121 (SAW) a svařovací poloha byla PA. Režim tepelného zpracování byl $670\text{ °C} \pm 5\text{ °C}/8\text{ hod.}$ Tento svarový spoj simuluje opravné navařování na rotoru. Jedná se opět o nedegradovaný materiál.

Výsledky rozboru chemického složení návaru Union S1 CrMo2V je uvedeno v **Tab. 12**.

Tab. 12 Chemické složení návaru

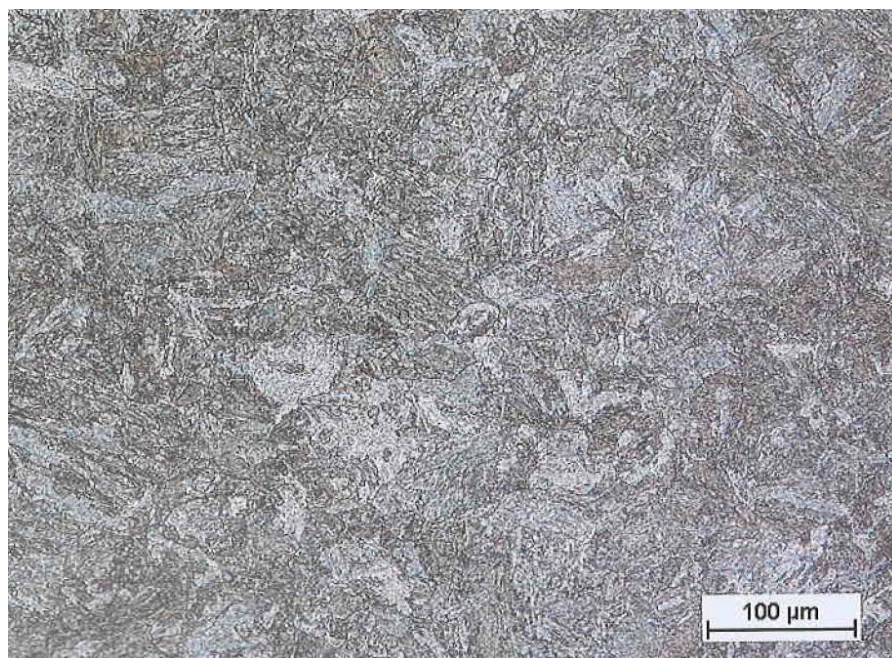
		C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Cu	P	S
Návar										
Union	S1	0,07	1,28	0,12	2,39	0,9	0,26	0,04	0,006	0,005
[%]										

Byla provedena kontrola makrostruktury materiálu hlubokým leptáním směsí Nital a pomocí stolní stereo lupy Zeiss Jena vizuálně prozkoumána. Na naleptané ploše vzorku nebyly nalezeny žádné vady, viz **Obr. 66**.

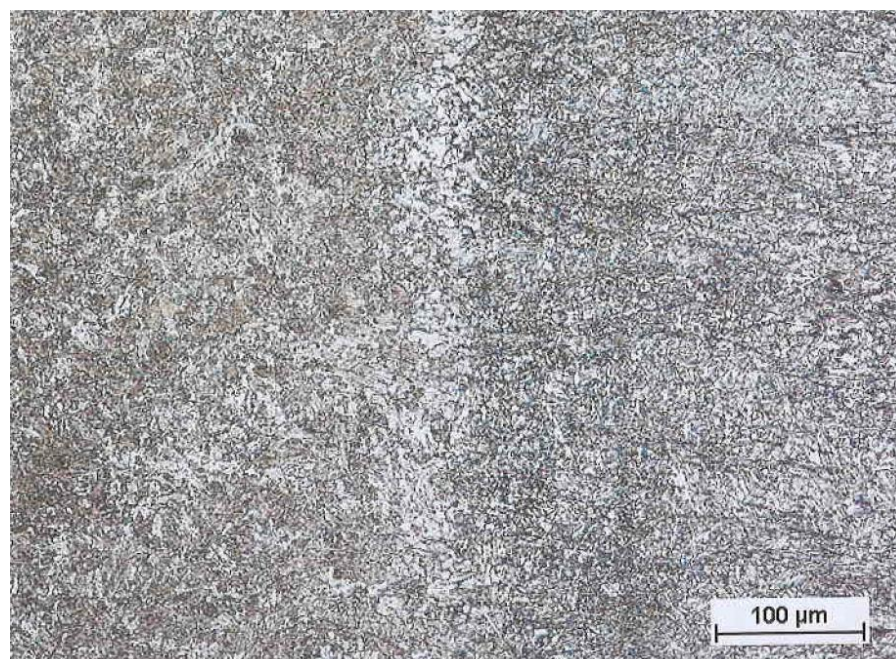


Obr. 66 Makro svarového spoje

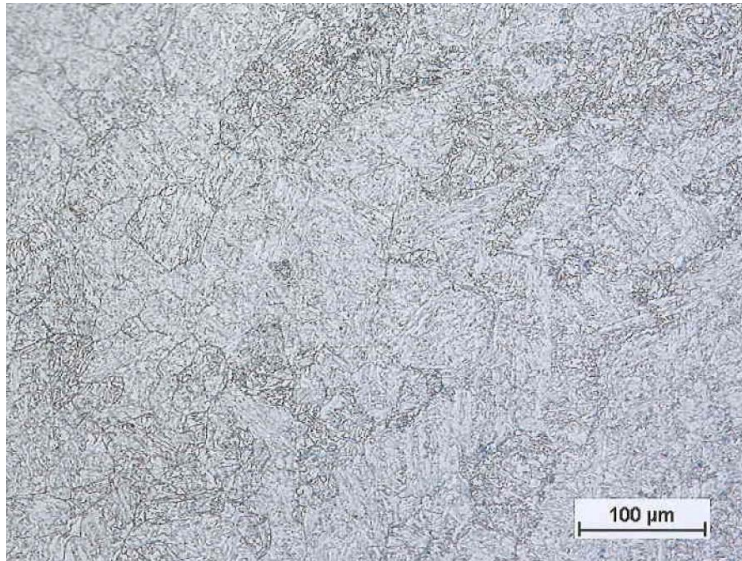
Dále byla provedena zkouška mikrostruktury základního materiálu, přechodové oblasti a oblasti návaru pomocí metalografického mikroskopu Epiphot 300, viz **Obr. 67** až **Obr. 69**. Mikrostruktura byla tvořena bainitem, na zkušebním vzorku nebyl nalezen žádný delta ferit.



Obr. 67 Mikrostruktura ZM (zvětšení 100x)

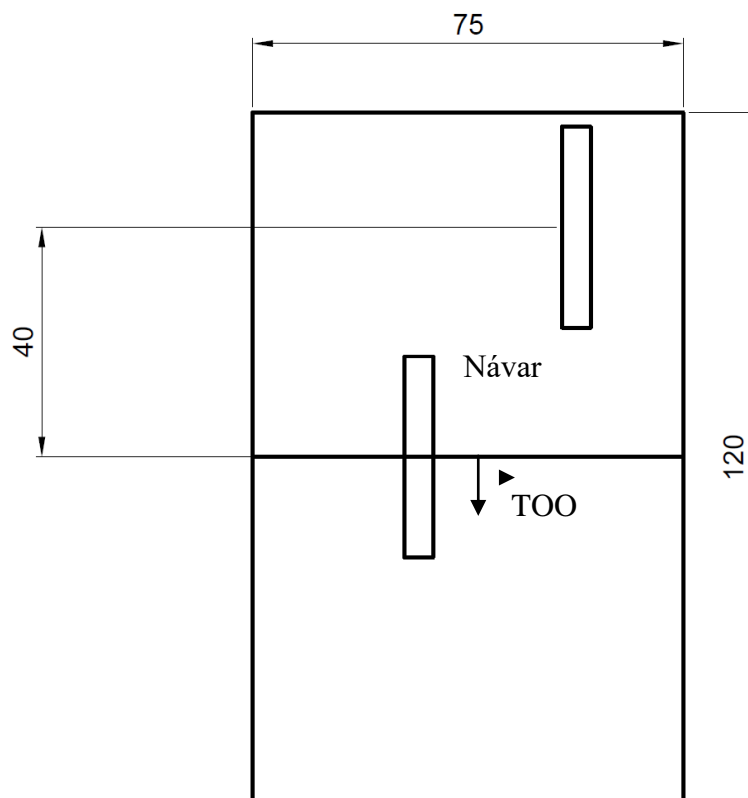


Obr. 68 Mikrostruktura přechodové oblasti, ZM vlevo, SK vpravo (zvětšení 200x)



Obr. 69 Mikrostruktura svarového kovu (zvětšení 200x)

Zkušební vzorky byly odebrány v radiálním směru v oblasti přechodu základního materiálu a návaru označené jako TOO viz **Obr. 70.**, dále byla vybrána kritická oblast ve vzdálenosti 40mm od svarového spoje v oblasti návaru.



Obr. 70 Umístění zkušebních tyčí ve svarovém spoji

Pro svarový spoj byly provedeny mechanické zkoušky v oblasti základního materiálu, TOO a návaru. Výsledky zkoušek jsou uvedeny v tabulce **Tab. 13**, **Tab. 14**. Byl proveden průběh měření tvrdosti přes svarový spoj HV10 **Tab. 15**.

Tab. 13 Výsledky zkoušek tahem

Vzorek	Tepl.	R _{p0,2}	R _m
	°C	MPa	MPa
ZM_1	20	621,8	759,1
ZM_2	20	625,1	760,7
TOO_1	20	589,7	726,4
TOO_2	20	592,0	723,4
Návar_1	20	656,3	741,3
Návar_2	20	660,6	742,6

Tab. 14 Výsledky zkoušek rázem v ohybu

Vzorek	Tepl.	KV
	°C	J
ZM_1	23	75
ZM_2	23	22
ZM_3	23	25
TOO_1	23	140
TOO_2	23	430
TOO_3	23	135
Návar_1	23	58
Návar_2	23	98
Návar_3	23	61

Tab. 15 Výsledky průběhu tvrdosti HV10 přes svarový spoj, vzdálenost vtisků byla 1mm.

ZM	ZM	ZM	ZM	ZM	TOO	TOO	TOO	návar	návar	návar	návar	návar
227	225	219	218	221	203	236	266	272	260	272	249	206

Z průběhu tvrdosti je vidět, že oblast návaru není homogenní, že navařování jednotlivých vrstev a následné postupné žihání mění mechanické vlastnosti jednotlivých míst, což je důležité pro umístění zkušebních vzorků a pro vysvětlení velkého rozptylu výsledků jednotlivých zkoušek.

8. Vyhodnocení tahových vlastností

Cílem této experimentální části práce je porovnání výsledků zkoušek tahem na klasických standardních zkušebních tělesech a na malých vzorcích viz **Obr. 71**. Cílem bylo porovnat výsledky zkoušek Small Punch Test a mikro vzorků, včetně posouzení přípravy zkušebního tělesa a zejména vyhodnocení materiálových charakteristik, zejména R_m , $Rp_{0,2}$, A , Z , jejich korelací, nebo v případě mikro tahových zkoušek přímé určení hodnot bez nutnosti korelace. Pro porovnání byl vybrán materiál po provozu a zkušební svar – návar bez degradace. Tyto materiály jsou používány na komponenty, u kterých by byl vhodný i semidestruktivní odběr pro určení zbytkové životnosti, nebo v případě návaru určení lokálních materiálových charakteristik a zjištění nultých stavů materiálu komponenty.



Obr. 71 Porovnání jednotlivých zkušebních vzorků

8.1. Standardní zkoušky tahem

Zkoušky tahem za okolní teploty byly provedeny dle ČSN EN ISO 6892-1 na zkušebním stroji ZWICK Z250. Zkušební tyče pro zkoušku tahem se závitovými hlavami, viz **Obr. 72**.



Obr. 72. Zkušební tyče pro zkoušku tahem

8.2. Zkoušky SPT

Pro zkoušky Small Punch Test byly zkušební vzorky vyrobeny z polotovaru KR8-65mm, který byl umístěn tak, aby odpovídal stejnému směru zatěžování jako klasický vzorek. Řezací pilou MICRON 3000 byly nařezány zkušební disky s přídatkem na finální broušení, z důvodu zamezení tepelného ovlivnění vzorku byly nastaveny optimální otáčky 3000/min a materiál byl neustále chlazen. Na metalografické leštičce byl zhotoven finální povrch. Pro přesné měření tloušťky disku je potřeba vzorek vyjmout z přípravku, očistit lihem a osušit fénem. Měření bylo možné provést až poté, co se teplota vzorku vyrovnala pokojové teplotě. U většiny vzorků se dosáhlo požadované přesnosti, tzn. 0,498 – 0,502 mm. Výroba zkušebního disku trvá minimálně 60 minut.

Zkoušky SPT za okolní teploty ve vyrobeném přípravku viz **Obr. 73** byly provedeny na zkušebním stroji Zwick – Z250, na kterém byl použit siloměr s kapacitou 10kN. Přípravek byl navržen v souladu s navrhovanou normou CEN [8]. Stejný přípravek se používá i pro creepové zkoušky SP.

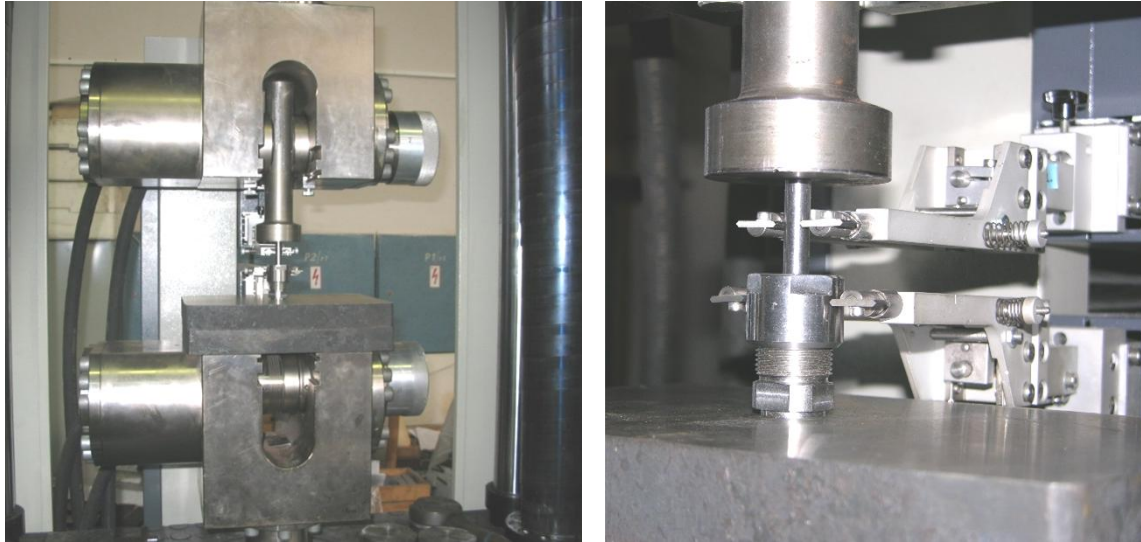


Obr. 73. SP Test přípravek rozložený [83]



Obr. 74. SP Test přípravek složený [83]

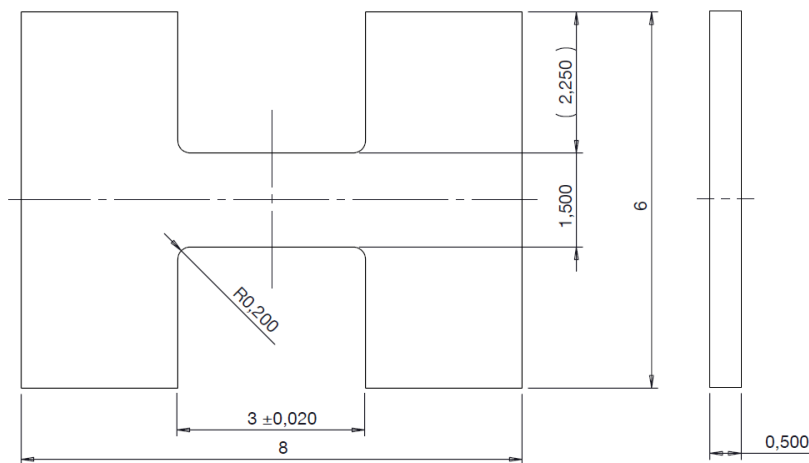
Zkušební disk se umístí na speciální podložku (lisovnici - 1) a společně s ní je vložen do spodní části přípravku (pouzdra - 2). Poté se horním otvorem spodní části přípravku (2) vloží lisovnick (4). Ten zajistí „dosednutí“ lisovnice se vzorkem na dno spodní části přípravku a zároveň poslouží k vložení keramické kuličky o průměru 2,5mm. Ta se díky zužujícímu se průměru lisovnicku ocitá přesně na středu vzorku. Část 2 je spojena šroubovým spojením s částí 3 (matice). Kompletní přípravek je uzavřen částí 5 (děrovač). Poté je přípravek umístěn na tuhé broušené podložce na spodní čelisti zkušebního stroje ZWICK Z250, viz **Obr. 75** a pomocí tlačného čepu stlačován konstantní rychlostí posuvu příčnicku 0,5 mm/min. Aby byla zajištěna shodná přítláčná síla pro všechny zkoušky, byl přípravek dotahován momentovou silou 25 Nm pomocí momentového klíče.



Obr. 75 Uspořádání zkoušky ve zkušební stroj Zwick – Z250 [83]

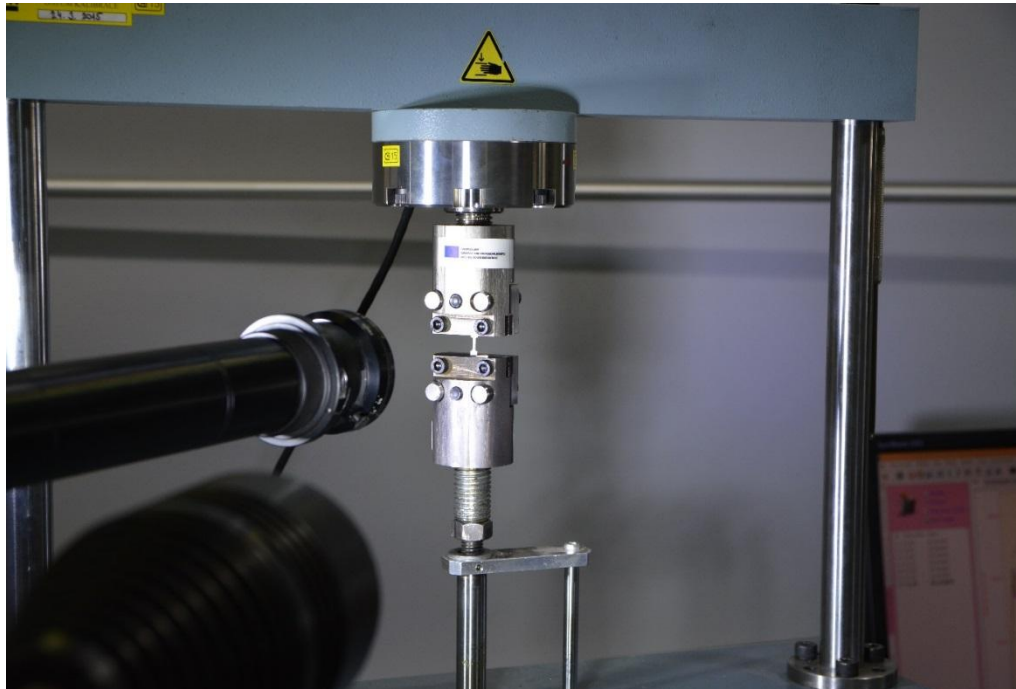
8.3. Mikro tahové zkoušky

Mikro tahové zkušební vzorky pro zkoušky tahem, viz **Obr. 76**, byly vyrobeny z polotovaru 6x8 mm a nařezány na tloušťku 0,5mm, vybrání bylo vyrobeno drátovou řezačkou FANUC C600iA.



Obr. 76 Geometrie zkušebního tělesa pro mikro tahovou zkoušku [4]

Zkoušky byly provedeny na zkušebním stroji Zwick 250 se siloměrem 10kN s mechanickými průtahoměry. V případě posledního materiálu byly vzorky zkoušeny pro porovnání výsledků také na trhacím stroji s lineárním motorem se silovou kapacitou 5kN v laboratoři firmy COMTES FHT a deformace byla snímána opticky. **Obr. 77**



Obr. 77 Sestavení zkoušky pro mikro vzorek

V následujících diagramech a tabulkách jsou dokumentovány výsledky provedených zkoušek tahem za normální okolní teploty pro jednotlivé použité materiály a porovnávány s výsledky standardních zkoušek tahem.

8.4. Experimentální výsledky materiálu 15 128

Pro materiál 15 128 po provozu byly provedeny zkoušky tahem při pokojové teplotě na standardních vzorcích, na mini vzorcích a malých vzorcích metodou SPT. V následujících tabulkách jsou uvedeny výsledky jednotlivých zkoušek. Pro statisticky významný soubor bylo provedeno 17 zkoušek mini vzorků a 30 zkoušek SPT.

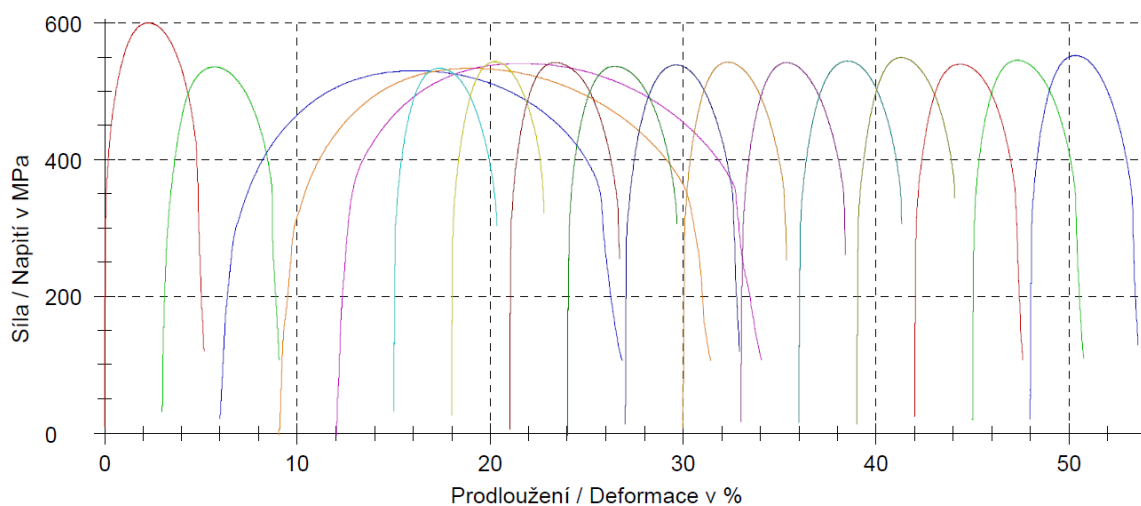
Tab. 16 Naměřené hodnoty klasických zkoušky z oceli 15 128

Vzorek	d[mm]	S[mm ²]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A[%]	Z[%]
1	10	78,54	348	519	27,6	74
2	10	78,54	358	521	27,4	74
17	10	78,54	360	526	27,8	74
18	10	78,54	367	529	28,4	70
Průměr			358	524	28	73
Sm. odchylka σ			6,8	3,97	0,37	1,73

Tab. 17 Naměřené hodnoty pro mikro vzorky z oceli 15 128

Poř. č.	Vzorek	a ₀ [mm]	b ₀ [mm]	S ₀ [mm ²]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A[%]	Pozn.
1	P_25	1,43	0,43	0,61	430	601	30	
2	P_26	1,44	0,49	0,71	363	537	29	
3	P_27	1,42	0,49	0,70	304*	531*	29*	bez snímače
4	P_28	1,41	0,5	0,71	322*	534*	28*	bez snímače
5	P_29	1,41	0,48	0,68	349*	542*	30*	bez snímače
6	P_30	1,42	0,49	0,70	374	534	31	
7	P_31	1,43	0,48	0,69	378	544	31	
8	P_32	1,42	0,49	0,70	379	543	36	
9	P_33	1,42	0,49	0,70	379	537	30	
10	P_34	1,41	0,49	0,69	358	539	32	
11	P_35	1,42	0,49	0,70	383	543	35	
12	P_36	1,40	0,49	0,69	377	543	34	
13	P_37	1,42	0,47	0,67	379	545	34	
14	P_38	1,40	0,49	0,69	381	550	30	
15	P_39	1,40	0,49	0,69	379	541	36	
16	P_40	1,41	0,48	0,68	390	546	31	
17	P_41	1,42	0,49	0,70	385	553	35	
Průměr					371	545	32	
Sm. odch.					26,83	15,08	2,55	

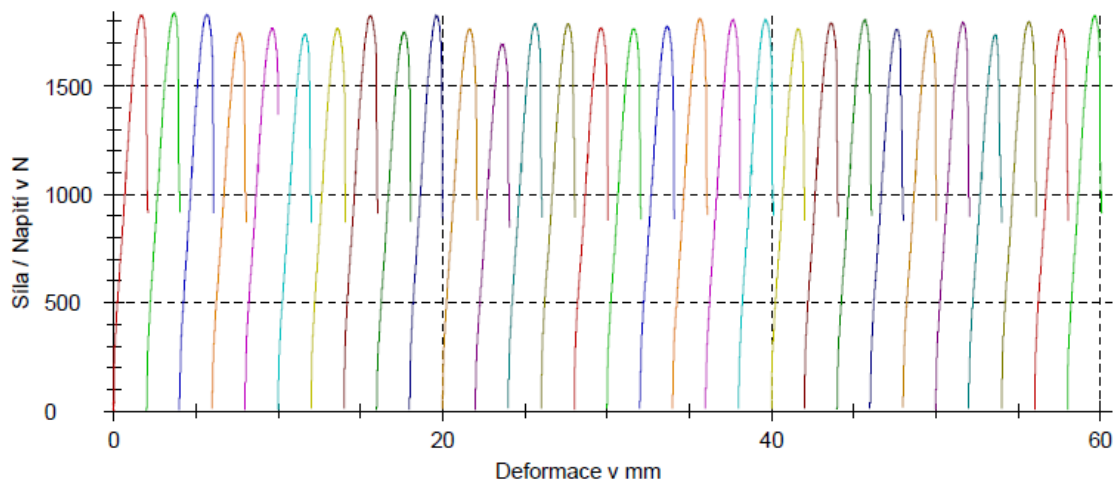
*) tyto hodnoty nebyly dále uvažovány



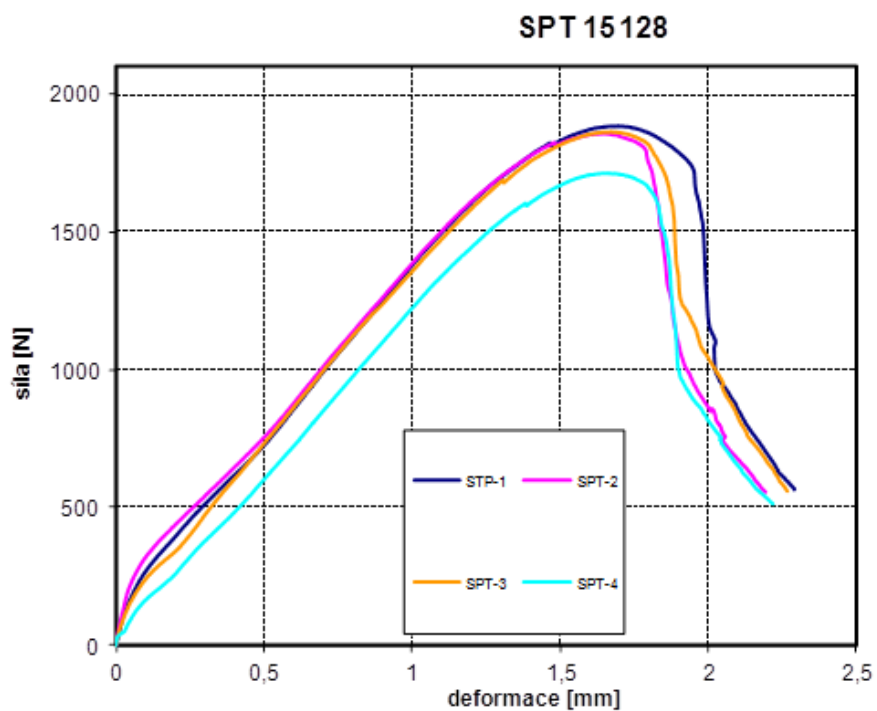
Obr. 78 Grafický záznam mikro tahových zkoušek pro materiál 15 128

Tab. 18 Naměřené hodnoty SPT zkoušky z oceli 15 128

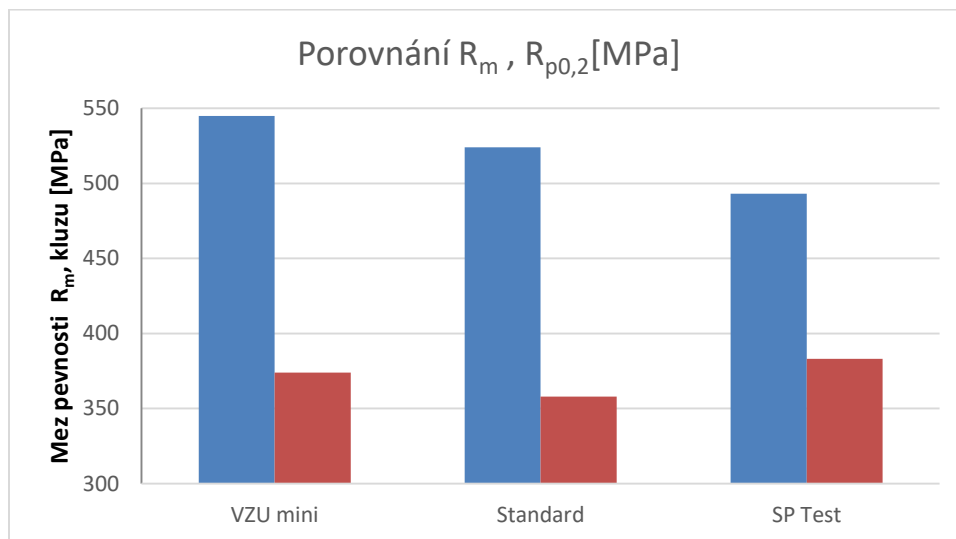
Vzorek	Tepl. [°C]	Tloušťka vzorku [mm]	F_{max} [N]	Max deformace [mm]	F_e [N]	$R_{p0,2SPT}$ [MPa]	R_{mSPT} [MPa]
1	23	0,505	1831	1,702	115	313	495
2	23	0,502	1843	1,714	176	479	501
3	23	0,500	1830	1,709	163	443	499
4	23	0,485	1756	1,701	174	468	484
5	23	0,495	1770	1,649	160	431	488
6	23	0,485	1745	1,648	145	391	477
7	23	0,495	1772	1,619	142	383	487
8	23	0,499	1833	1,673	131	353	506
9	23	0,491	1754	1,731	119	317	489
10	23	0,506	1831	1,742	139	371	510
11	23	0,495	1762	1,684	132	357	481
12	23	0,485	1704	1,691	137	370	434
13	23	0,493	1795	1,673	168	454	501
14	23	0,499	1798	1,658	154	412	507
15	23	0,493	1773	1,673	138	371	489
16	23	0,495	1774	1,638	131	351	490
17	23	0,495	1786	1,716	145	396	496
18	23	0,502	1811	1,742	128	350	505
19	23	0,500	1810	1,754	129	352	506
20	23	0,499	1813	1,679	125	341	509
21	23	0,496	1774	1,686	178	481	490
22	23	0,498	1796	1,645	164	443	491
23	23	0,498	1814	1,708	161	435	503
24	23	0,496	1765	1,687	123	329	495
25	23	0,495	1768	1,642	119	319	485
26	23	0,504	1792	1,673	132	353	495
27	23	0,491	1746	1,345	139	380	483
28	23	0,497	1806	1,718	128	347	501
29	23	0,495	1762	1,649	127	341	481
30	23	0,500	1834	1,732	131	358	517
Průměr			1788	1,676	142	383	493
Sm. odch.			65,12	0,14	18,04	49,02	14,8



Obr. 79 Grafický záznam zkoušek SP pro materiál 15 128



Obr. 80 Příklad záznamu pro vyhodnocení zkoušek SPT pro materiál 15 128



Obr. 81 Porovnání meze pevnosti a kluzu

8.5. Experimentální výsledky návaru

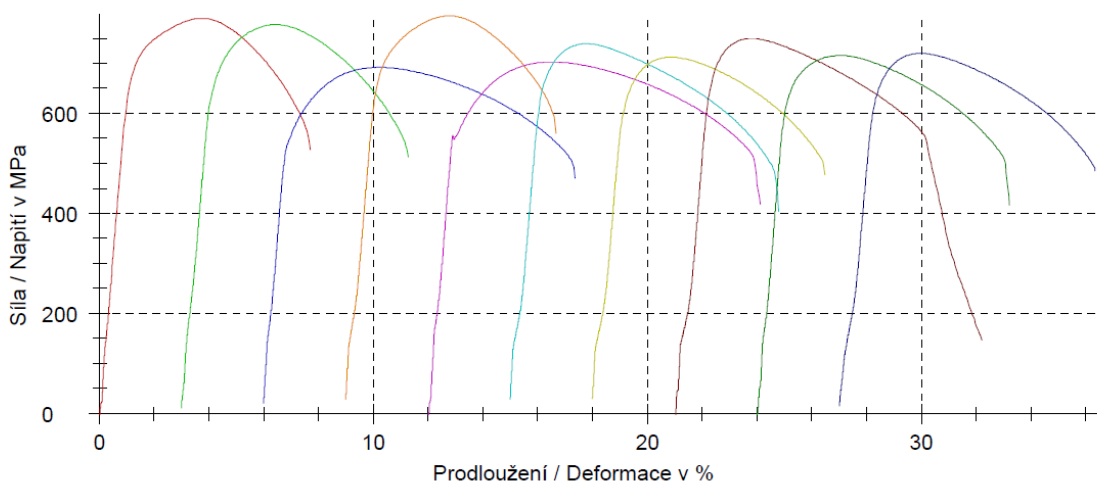
Zkušební svarový spoj - návar byl rozdělen na oblasti – ZM, TOO a oblast návaru, která byla 40mm od referenčního přechodu dle naleptání. Vzorky byly označené 8 – přechod TOO, 9 – oblast návaru.

Tab. 19 Naměřené hodnoty standardních zkoušek

Vzorek	d[mm]	S[mm ²]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]
ZM_1	10	78,54	622	759
ZM_2	10	78,54	625	760
Průměr			624	760
Sm. Odch.			1,5	0,5
Přechod 1	10	78,54	589	726
Přechod 2	10	78,54	592	723
Průměr			591	725
Sm. Odch.			1,5	1,5
Návar 1	10	78,54	656	741
Návar 2	10	78,54	660	742
Průměr			658	742
Sm. Odch.			2,0	0,5

Tab. 20 Naměřené hodnoty mikro-tahových zkoušek – zkušebna 1 (VZU)

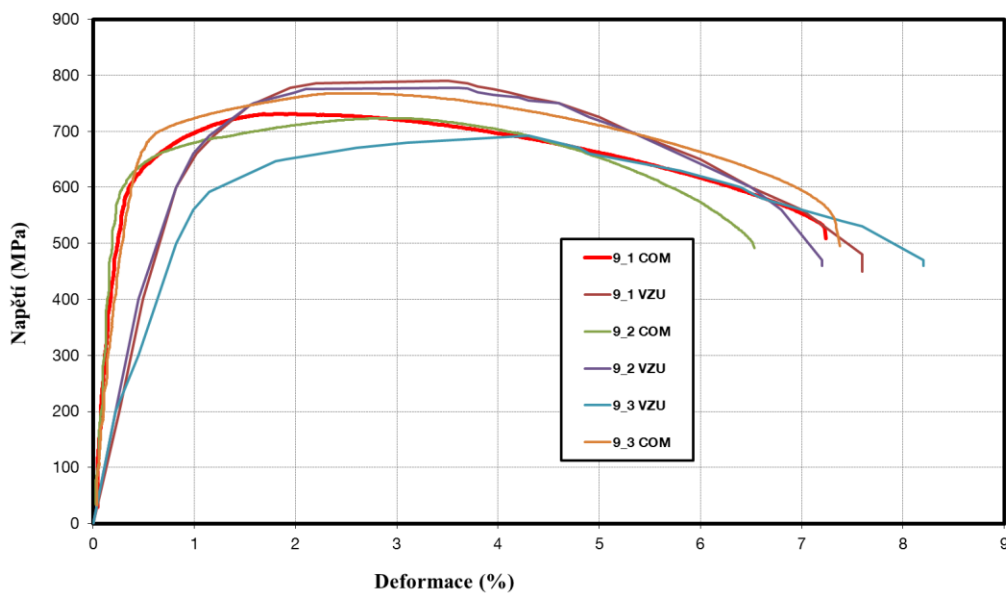
Vzorek	Tepl. [°C]	a ₀ [mm]	b ₀ [mm]	S ₀ [mm ²]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]
9_1	25	0,47	1,50	0,71	685	790
9_2	25	0,46	1,49	0,69	671	778
9_3	25	0,48	1,50	0,72	559	692
9_4	25	0,50	1,48	0,74	688	795
9_5	25	0,48	1,47	0,71	560	703
Průměr					633	752
Sm. Odch.					59,9	44,6
8_1	25	0,48	1,50	0,72	671	739
8_2	25	0,49	1,51	0,74	639	713
8_3	25	0,48	1,50	0,72	686	750
8_4	25	0,48	1,50	0,72	643	716
8_5	25	0,48	1,51	0,72	651	720
Průměr					658	728
Sm. Odch.					17,8	14,4



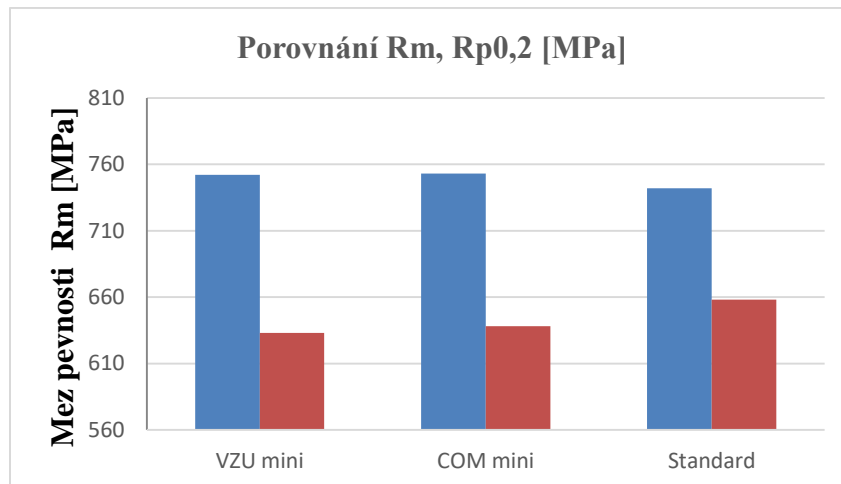
Obr. 82 Grafický záznam zkoušek pro svarový spoj

Tab. 21 Naměřené hodnoty mikro-tahových zkoušek – zkušebna 2 (COMTES)

Vzorek	Tepl. [°C]	a ₀ [mm]	b ₀ [mm]	S ₀ [mm ²]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]
9_1	25	0,49	1,51	0,74	628	731
9_2	25	0,47	1,50	0,71	634	723
9_3	25	0,49	1,51	0,74	684	768
Průměr					649	741
Sm. Odch.					25,1	19,6
8_1	25	0,49	1,51	0,74	523,3	644
8_2	25	0,49	1,51	0,74	540,1	653
Průměr					532	648
Sm. Odch.					8,4	4,5



Obr. 83 Porovnání grafického záznam mikro tahových zkoušek



Obr. 84 Porovnání meze pevnosti a kluzu v oblasti návaru

8.6. Diskuze výsledků zkoušky tahem

Pro zkoušky tahem byly odzkoušeny dva materiály, jednalo se o oceli používané v energetickém průmyslu zejména pro výrobu parovodů a rotorů. Materiály byly vybrány s ohledem na praktické využití i pro případný odběr vzorku odběrovým zařízením. Byla provedena zkouška tahem na klasických zkušebních tyčích a pomocí SPT. V případě materiálu parovodu se jednalo o rozšíření databáze materiálů pro vývoj zkušební metodiky. V mechanické zkušební společnosti VZU Plzeň není žádný software pro vyhodnocování záznamů SPT zkoušek, ve spolupráci s oddělením počítačové modelování byla vyvinuta šablona v programu Excel 2013 pro stanovení charakteristik F_m [N], F_e [N] z nichž byla následně vyhodnocena mez kluzu a pevnosti. Na základě vztahu (38) byl proveden přepočet síly na napětí a byl použit korelační koeficient z výsledků klasické zkušební tyče. Pro vyhodnocení meze kluzu byla použita metoda proložení dvou tečen. Průsečík těchto přímků pak udává polohu na vodorovné ose u_A a hodnota síly na křivce $F(u)$ odpovídající bodu posunutí u_A je nalezena hodnota F_e , viz kapitola 6.2.4.

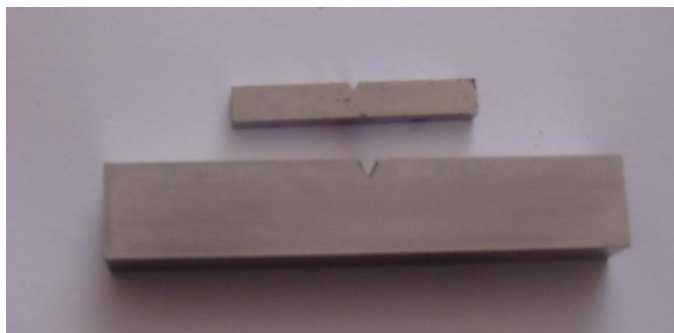
V případě materiálu parovodu byl rozdíl mezi hodnotou meze pevnosti a kluzu ve srovnání s výsledky standardním vzorků a stanovenou mikro vzorkem 4 a 4,5% (21 a 16MPa) a -6% resp. +7% (-31 a +25MPa) u SPT vzorku. Shoda výsledků byla dobrá, u SPT vzorků je výsledek daný korelačním vztahem, který není obecný, ale je určen z konkrétních výsledků standardní tahové zkoušky.

V případě druhého materiálu, v oblasti návaru byly pro porovnání provedeny zkoušky M-TT ve dvou laboratořích. Výsledky dosáhly rozptylu oproti výsledkům standardních zkoušek 1,3 a 1,5% (+10 a +11MPa) u meze pevnosti a -3,8 a -3% (-25 a -20MPa) u meze kluzu

Stanovení tahových charakteristik pomocí M-TT představuje stejný mód zatěžování jako klasické zkoušky tahem, navíc lze stanovit i hodnoty tažnosti a kontrakce, které u použití metody SPT nelze vyhodnotit. Provedené porovnání bylo i přes malý počet vzorků velmi příznivé pro miniaturní tahové vzorky.

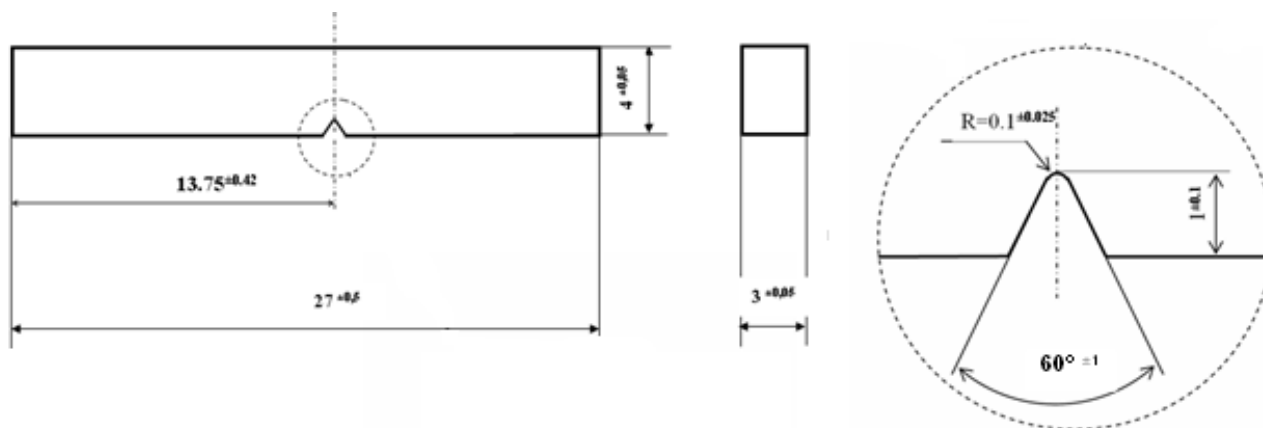
9. Zkouška rázem v ohybu

Cílem této experimentální části práce je porovnání zkoušek rázem v ohybu a určení přechodové teploty $FATT_{50}$ stanovené na standardních zkušebních tělesech a mini vzorcích, nalezení vztahu Δt mezi těmito teplotami pro sledované geometrie vzorků a materiály.



Obr. 85 Porovnání klasického zkušebního vzorku a vzorku mini Charpy

Geometrie zkušebního miniaturizovaného tělesa (mini-Charpy) vychází z objemu experimentálního materiálu (polotovaru), který je možno odebrat pomocí elektro-erozivního odběrového zařízení (EDSE). Geometrie miniaturizovaných zkušebních těles je vyobrazena na Obr. 86 a vychází z normy ČSN EN ISO 14556.



Obr. 86. Rozměry zkušebního mini vzorku

Literatura, např. [79], i interní zkušenosti laboratoře uvádějí teplotní posuv Δt mezi přechodovými teplotami $FATT_{50}$ pro standardní a mini vzorky cca 60 °C.

Zkoušky rázem v ohybu metodou Charpy byly provedeny dle ČSN ISO 148-1 a dle ČSN EN ISO 14556 (Instrumentovaná zkušební metoda) na instrumentovaných kladivech Charpy o kapacitě 15J pro mini zkušební tělesa a s kapacitou 300J pro standardní rozměry zkušebního vzorku. Zkušební sady měly cca 18 vzorků, přičemž zkoušky byly realizovány min. při 5 zkušebních teplotách a byly zkoušeny min. 2 vzorky na jedné teplotě. Podíl křehkého lomu byl stanoven z instrumentovaných záznamů pomocí rovnice (15), bylo provedeno i hodnocení vzhledu lomových ploch. Tímto způsobem byly vyhodnoceny obě sledované geometrie.

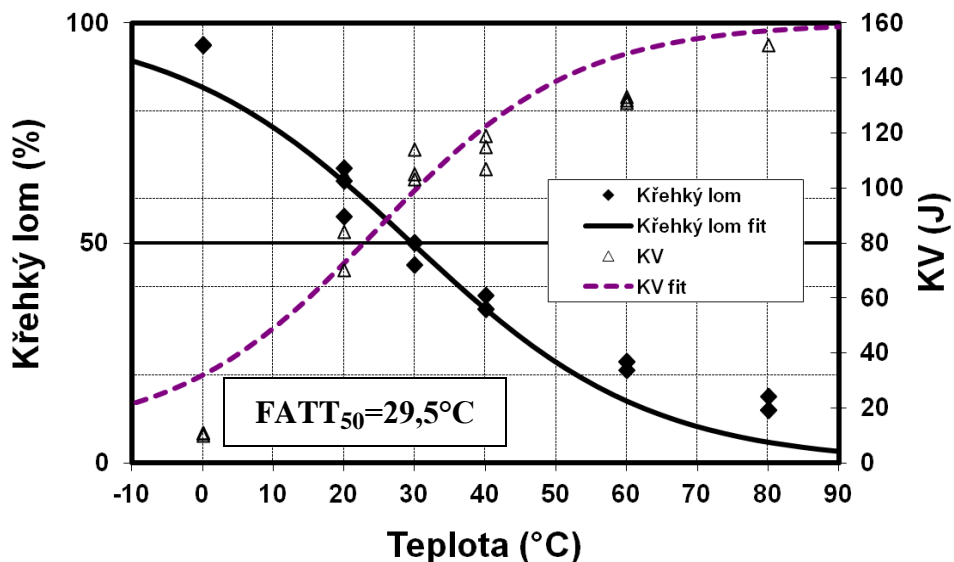
Pro vyhodnocení teplotního posunu mezi $FATT_{50}$ stanovenými pro standardní a mini vzorky byly vybrány materiály parovodu po provozu, z odlitku skříně po provozu a svarového spoje.

9.1. Materiál 15 128 -parovod po provozu

Z odřezku kolena z parovodu ostré páry byly vyrobeny zkušební vzorky v tangenciálním směru, co nejbližší k obvodu trubky a to jak pro standardní (označení O31-O48) tak pro mini Charpy vzorky (označení O1 – O18). Výsledky všech měření jsou shrnuty v tabulce **Tab. 22, Tab. 23** vyhodnocení přechodové teploty $FATT_{50}$ je znázorněno na obrázcích **Obr. 87, Obr. 88, Obr. 89**.

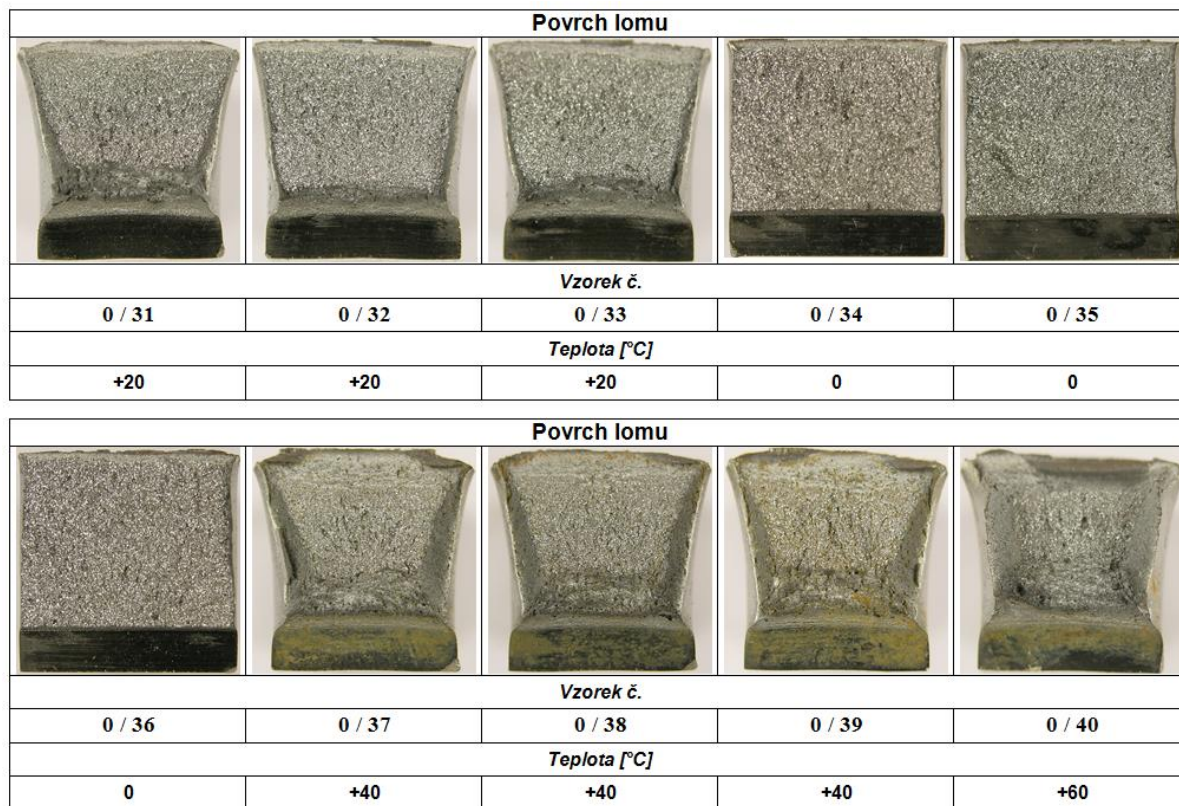
Tab. 22 Výsledky zkoušky rázem v ohybu na standardních zkušebních tělesech [75]

Vzorek	Vrub	Rozměry		Výška pod vrubem	Tepl.	KV ₂	KCV	BF
		w	h					
	V	mm	mm	mm	°C	J	J/cm ²	%
O31	V	10,00	10,01	7,99	20	105	131	56
O32	V	10,01	9,99	7,99	20	70	88	67
O33	V	10,00	10,00	8,00	20	84	105	64
O34	V	10,00	10,01	8,00	0	11	14	95
O35	V	10,01	10,01	7,98	0	11	14	95
O36	V	9,99	10,00	8,00	0	10	13	95
O37	V	10,00	10,01	7,99	40	115	144	35
O38	V	10,01	10,02	7,99	40	107	134	35
O39	V	10,01	10,01	7,98	40	119	149	28
O40	V	10,02	10,00	8,00	60	132	165	23
O41	V	10,01	10,00	8,00	60	131	164	23
O42	V	10,01	10,00	8,01	60	133	166	21
O43	V	10,00	10,01	7,99	80	161	202	12
O44	V	10,00	10,00	7,98	80	152	190	15
O45	V	10,02	10,01	8,01	80	162	202	12
O46	V	10,01	9,99	8,00	30	114	142	45
O47	V	9,98	10,00	8,00	30	105	132	50
O48	V	9,99	10,00	8,01	30	103	129	50



Obr. 87 Vyhodnocení přechodové teploty $FATT_{50}$ pro materiál 15 128, standardní vzorky

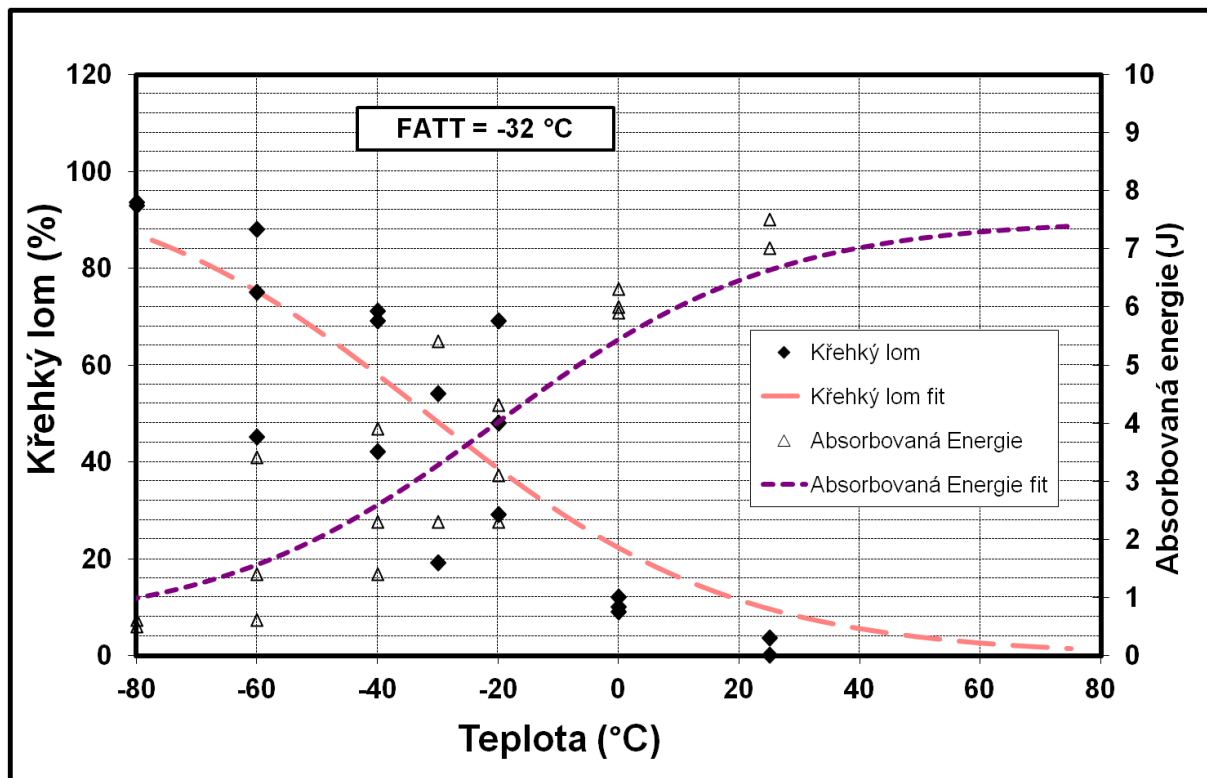
Hodnota přechodové teploty $FATT_{50}$ pro materiál 15 128.5 po provozu byla určena na 29,5°C. Lomové plochy standardních zkušebních vzorků jsou znázorněny na **Obr. 88**.



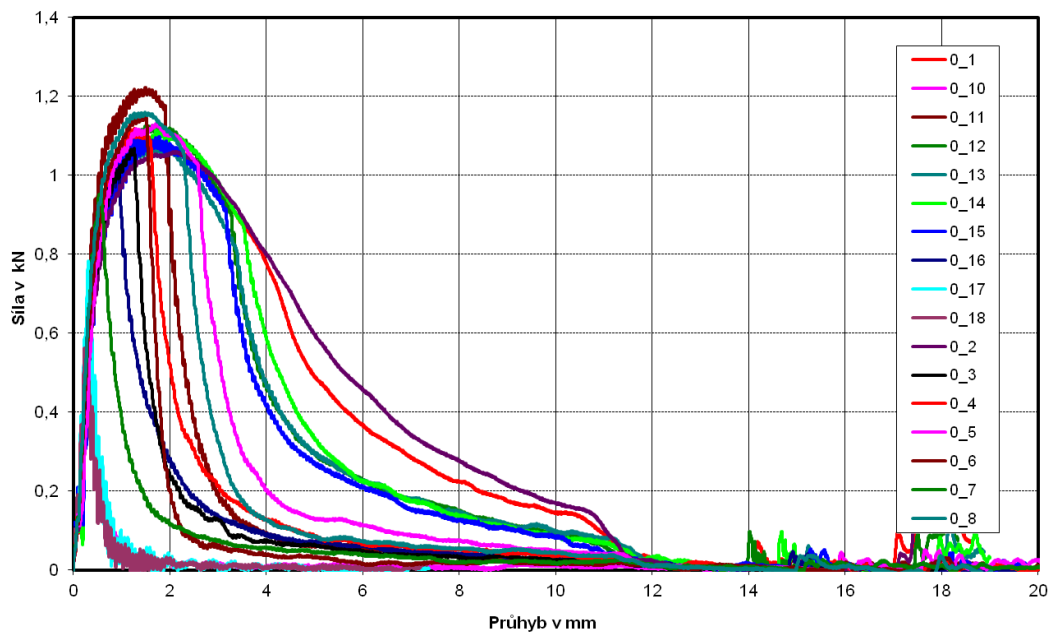
Obr. 88 Lomové plochy standardních zkušebních vzorků [75]

Tab. 23 Výsledky zkoušky rázem v ohybu materiálu 15 128, mini vzorky

Vzorek	Vrub	Rozměry		Výška pod vrubem	Tepl.	KV ₂	KCV	BF
		w	h					
	V	mm	mm	mm	°C	J	J/cm ²	%
O_1	V	3,02	3,98	3,00	25	7,0	77,3	96,5
O_2	V	3,02	3,98	3,00	25	7,5	82,8	100,0
O_3	V	3,02	3,98	3,00	-20	2,3	25,4	31,0
O_4	V	3,01	4,00	3,01	-20	3,1	34,2	52,0
O_5	V	3,01	4,00	3,01	-20	4,3	47,5	71,0
O_6	V	3,01	4,00	3,01	-40	2,3	25,4	29,0
O_7	V	3,00	3,98	3,00	-40	1,4	15,6	31,0
O_8	V	3,01	4,00	3,00	-40	3,9	43,2	58,0
O_9	V	3,01	4,00	3,00	-60	1,4	15,5	25,0
O_10	V	3,00	3,99	3,02	-60	0,6	6,6	12,0
O_11	V	3,00	3,99	3,02	-60	3,4	37,5	55,0
O_12	V	3,00	3,99	3,02	0	6,0	66,2	90,0
O_13	V	3,00	3,99	3,01	0	5,9	65,3	91,0
O_14	V	3,00	3,99	3,01	0	6,3	69,8	88,0
O_15	V	3,00	3,99	3,01	-30	5,4	59,8	81,0
O_16	V	3,00	4,00	3,01	-30	2,3	25,5	46,0
O_17	V	3,00	4,00	3,01	-80	0,6	6,6	6,5
O_18	V	3,00	4,00	3,01	-80	0,5	5,5	7,2



Obr. 89 Vyhodnocení přechodové teploty $FATT_{50}$ pro materiál 15 128, mini Charpy



Obr. 90 Záznamy instrumentovaných zkoušek mini Charpy z materiálu 15 128

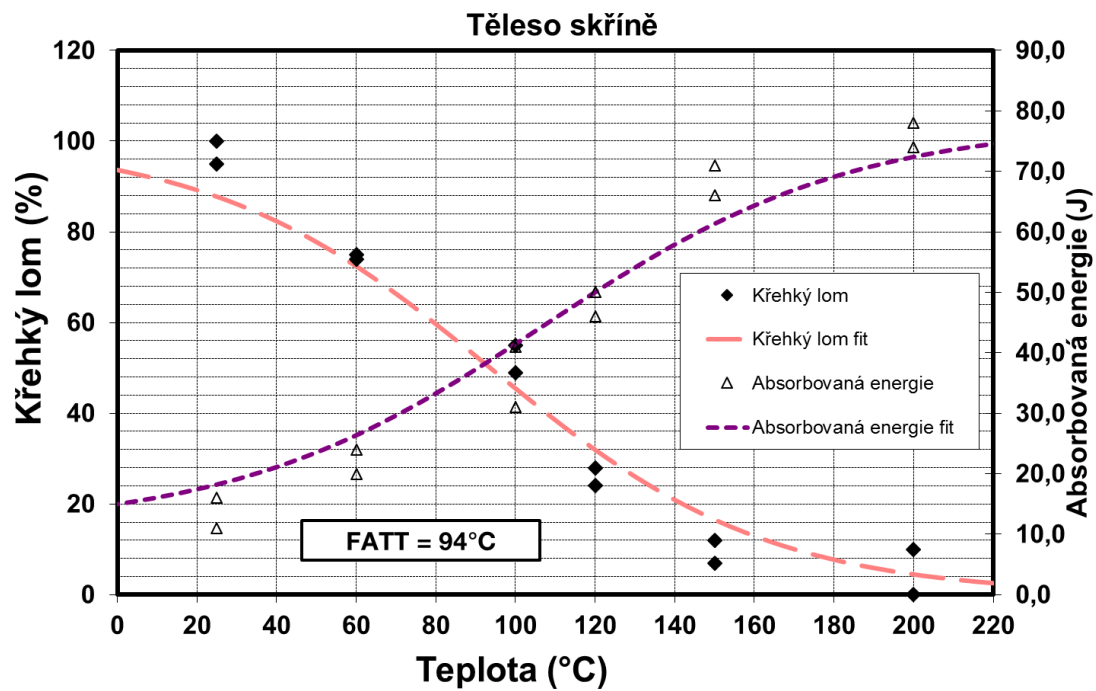
Hodnota přechodové teploty $FATT_{50}$ pro materiál 15 128.5 pomocí vzorků mini Charpy byla určena na -32°C . Posun v přechodových křivkách Δt je 62°C . Tento posun velmi dobře koresponduje s odhadem posunu 60°C mezi těmito výsledky.

9.2. Ocel na odlitky 42 2747 po provozu

Z materiálu byly vyrobeny standardní zkušební vzorky (označení 1 -16) a mini Charpy (označení M1-M18). Výsledky všech měření jsou shrnuty v tabulce **Tab. 24** a **Tab. 25** vyhodnocení přechodové teploty $FATT_{50}$ je znázorněno na obrázcích **Obr. 91**, **Obr. 92**.

Tab. 24 Výsledky zkoušky rázem v ohybu na standardních zkušebních tělesech pro materiál 42 2747 [66]

Vzorek	Vrub	Rozměry		Výška pod vrubem	Tepl.	KV ₂	KCV	BF
		w	h					
	V	mm	mm	mm	°C	J	J/cm ²	%
1	V	10,00	10,00	8,00	25	11	14	95
2	V	10,01	10,00	7,99	25	16	20	100
3	V	10,00	10,01	8,00	100	41	51	49
4	V	10,00	10,02	8,01	100	31	39	53
5	V	10,00	10,00	7,99	200	78	98	0
6	V	9,99	10,00	7,98	200	74	93	10
7	V	9,98	9,99	7,99	300	114	143	0
8	V	10,00	10,00	8,00	300	93	116	0
9	V	10,00	10,00	8,00	150	66	83	12
10	V	10,10	10,01	7,99	150	71	88	7
11	V	10,10	10,00	8,00	250	92	114	0
12	V	10,00	9,99	7,98	250	84	105	0
13	V	10,00	9,98	8,00	120	50	63	14
14	V	9,98	10,01	7,99	120	46	58	18
15	V	10,00	10,02	7,98	60	20	25	75
16	V	9,99	10,00	7,98	60	24	30	74

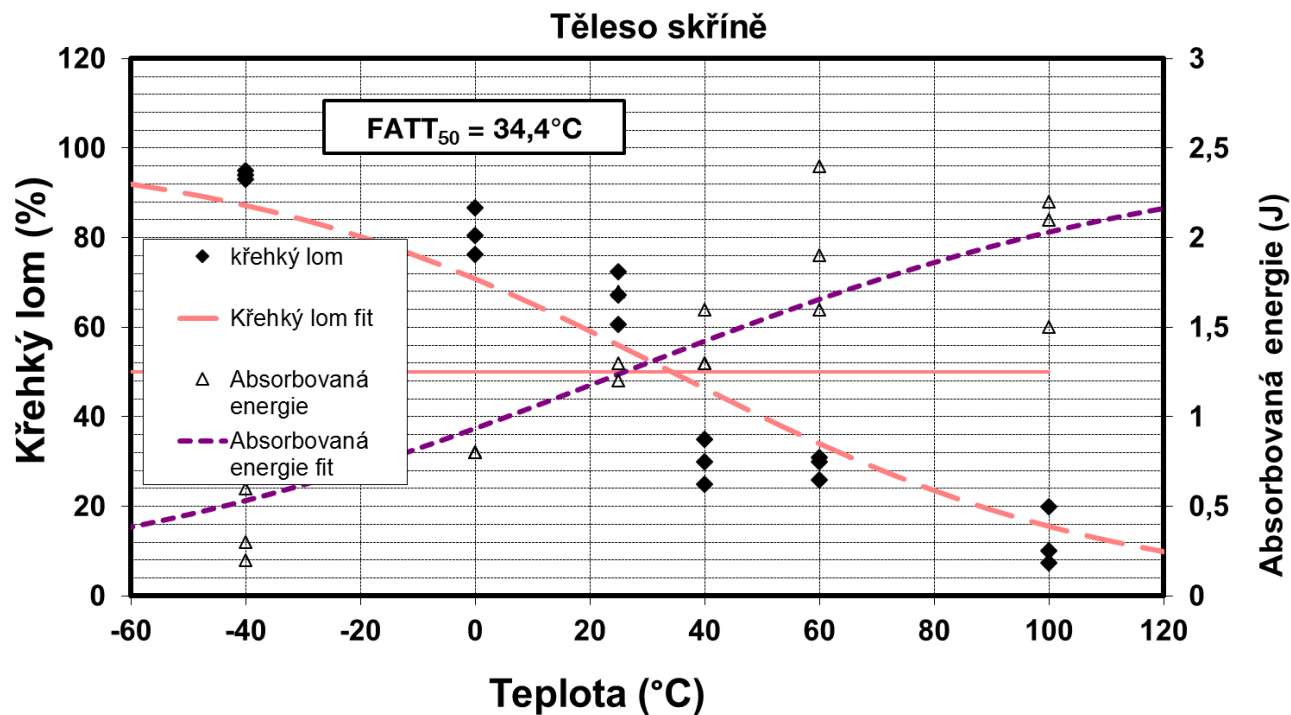


Obr. 91 Vyhodnocení přechodové teploty $FATT_{50}$ pro materiál ŠN 42 2747

Hodnota přechodové teploty $FATT_{50}$ pro materiál ŠN42 2747 po provozu byla určena na 94,0°C.

Tab. 25 Výsledky zkoušky rázem v ohybu na mini Charpy pro materiál ŠN 42 2747

Vzorek	Vrub	Rozměry		Výška pod vrubem	Tepl.	KV ₂	KCV	BF
		w	h					
	V	mm	mm	mm	°C	J	J/cm ²	%
M 1	V	3,01	4,00	3,00	25	1,7	18,8	60,7
M 2	V	3,00	3,98	3,00	25	1,3	14,4	67,3
M 3	V	3,01	3,98	3,00	25	1,2	13,3	72,5
M 4	V	3,01	4,00	3,01	0	0,8	8,8	86,8
M 5	V	3,01	4,00	3,01	0	0,8	8,8	80,5
M 6	V	3,01	4,00	3,01	0	0,8	8,8	76,2
M 7	V	3,00	3,98	3,00	40	1,3	14,4	31,4
M 8	V	3,01	4,00	3,00	40	1,6	17,7	50,9
M 9	V	3,01	4,00	3,00	40	1,3	14,4	21,4
M 10	V	3,00	3,99	3,00	60	2,4	26,7	38,2
M 11	V	3,00	3,99	3,02	60	1,9	21,0	26,1
M 12	V	3,00	4,00	3,00	60	1,6	17,8	31,0
M 13	V	3,00	3,99	3,01	-40	0,6	6,6	95,6
M 14	V	3,00	3,99	3,01	-40	0,3	3,3	94,2
M 15	V	3,00	3,99	3,01	-40	0,2	2,2	93,3
M 16	V	3,00	4,00	3,01	100	1,5	16,6	20,1
M 17	V	3,00	4,00	3,01	100	2,2	24,4	10,5
M 18	V	3,00	4,00	3,01	100	2,1	23,3	7,3



Obr. 92 Vyhodnocení přechodové teploty $FATT_{50}$ pro materiál ŠN 42 2747 pomocí mini Charpy

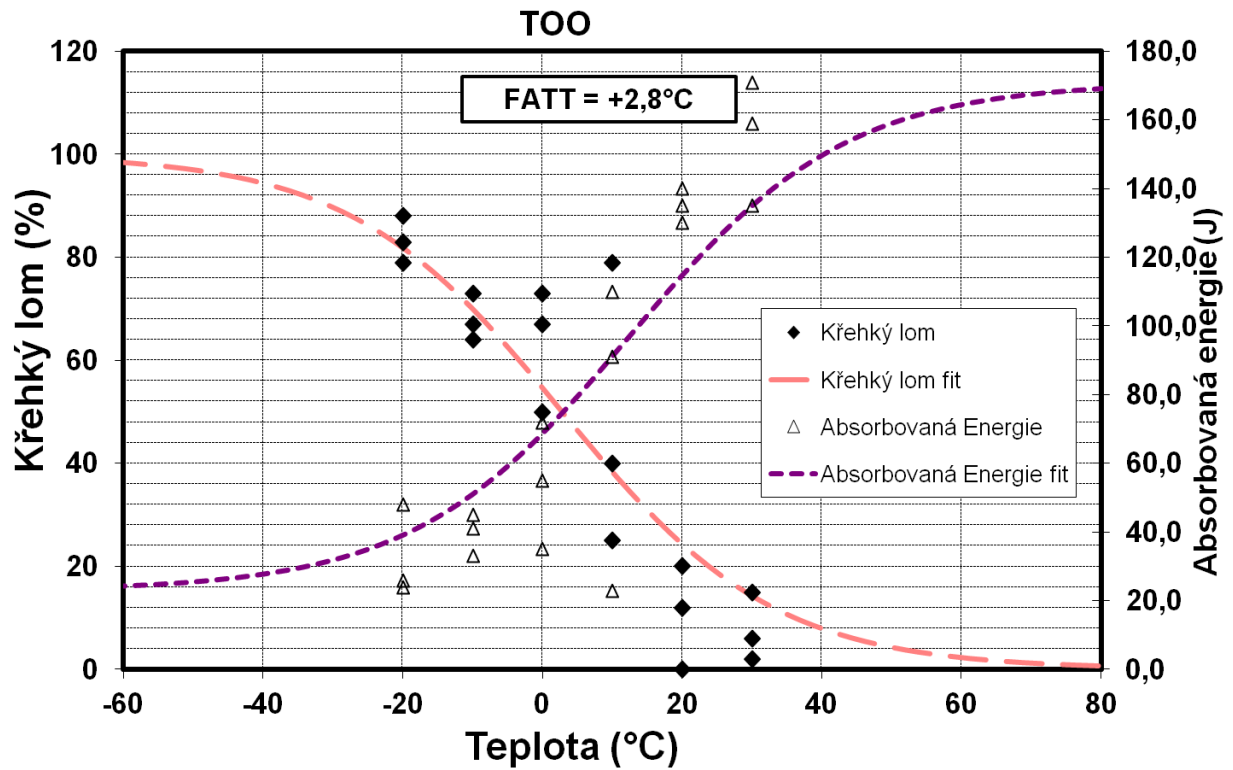
Hodnota přechodové teploty $FATT_{50}$ pro materiál ŠN42 2747 po provozu pomocí vzorků mini Charpy byla určena na 34,4°C. Posun přechodových teplot pro jednotlivé geometrie Δt je 60°C.

9.3. Svarový spoj

Z materiálu svarového spoje byly vyrobeny standardní zkušební vzorky v přechodu mezi základním materiálem a návarem (označení TOO_1 až TOO_18) a mini Charpy (označení 1 až 18), dále byly vzorky umístěny do oblasti návaru s označením N1 až N18 pro standardní zkušební vzorky a 19 až 36 pro mini Charpy. Výsledky všech měření jsou v tabulce **Tab. 26** až **Tab. 29**, vyhodnocení přechodové teploty $FATT_{50}$ na obrázcích **Obr. 93** až **Obr. 96**.

Tab. 26 Výsledky zkoušky rázem v ohybu – TOO, standard

Vzorek	Vrub	Rozměry		Výška pod vrubem	Tepl.	KV ₂	KCV	BF
		w	h					
	V	mm	mm	mm	°C	J	J/cm ²	%
TOO_1	V	10,00	10,01	7,99	20	140	175	0
TOO_2	V	10,01	10,02	7,99	20	130	163	20
TOO_3	V	10,01	10,01	7,98	20	135	169	12
TOO_4	V	10,00	10,00	8,00	-20	26	33	83
TOO_5	V	10,00	10,00	8,00	-20	24	30	79
TOO_6	V	10,00	10,01	8,00	-20	48	60	88
TOO_7	V	10,01	10,00	8,01	-10	41	51	64
TOO_8	V	9,99	9,99	8,00	-10	33	41	73
TOO_9	V	9,99	10,00	8,00	-10	45	56	67
TOO_10	V	10,00	10,00	7,99	0	35	44	73
TOO_11	V	10,00	10,01	7,99	0	55	69	67
TOO_12	V	9,99	10,00	7,98	0	72	90	50
TOO_13	V	9,99	9,98	7,99	10	91	114	40
TOO_14	V	9,98	9,99	7,99	10	110	138	25
TOO_15	V	10,00	10,00	8,00	10	23	29	79
TOO_16	V	10,01	9,99	8,00	30	135	169	15
TOO_17	V	10,00	9,98	7,98	30	171	214	2
TOO_18	V	10,02	9,99	8,00	30	159	198	6

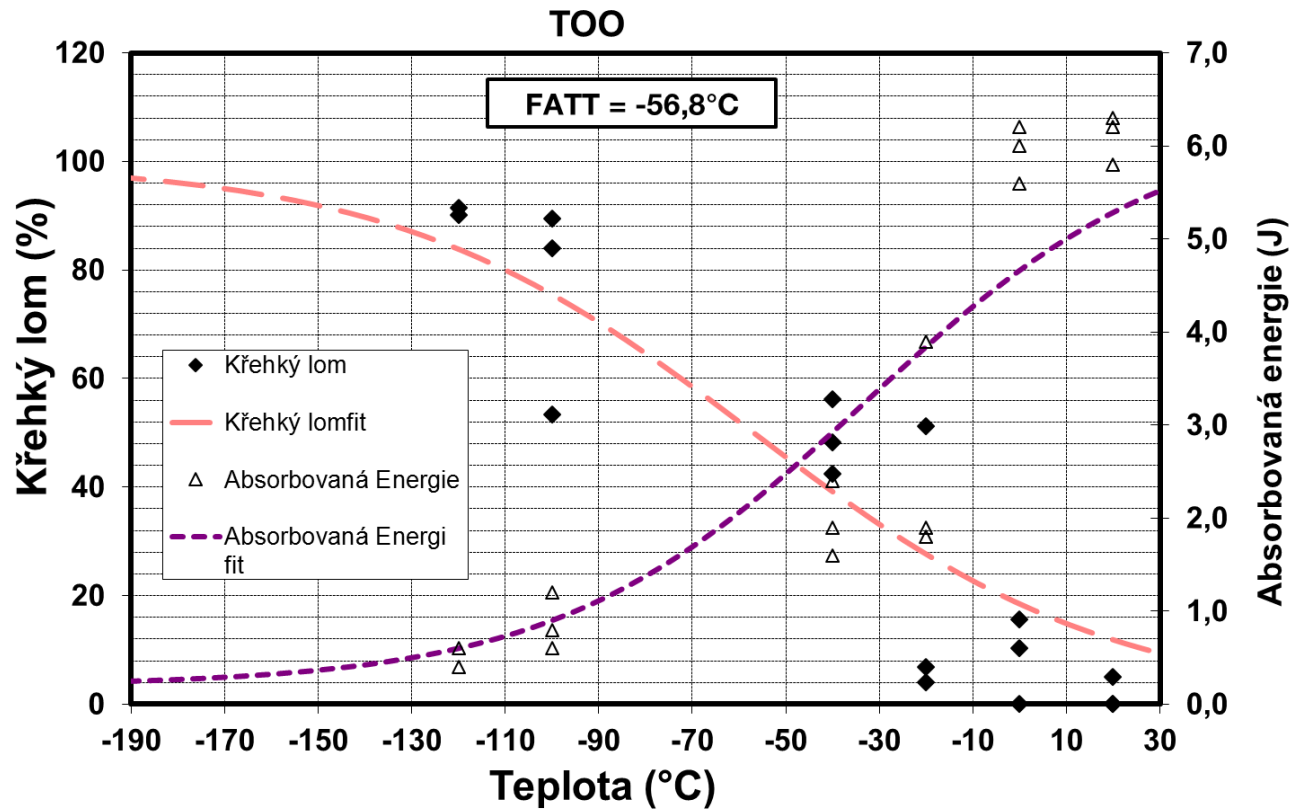


Obr. 93 Vyhodnocení přechodové teploty $FATT_{50}$ pro svarový spoj oblast TOO pomocí standardních zkušebních těles

Hodnota přechodové teploty $FATT_{50}$ pro svarový spoj oblast TOO stanovená pomocí standardních zkušebních těles byla určena na $2,8^{\circ}C$.

Tab. 27 Výsledky zkoušky rázem v ohybu na mini Charpy pro svarový spoj oblast TOO

Vzorek	Vrub	Rozměry		Výška pod vrubem	Tepl.	KV ₂	KCV	BF
		w	h					
	V	mm	mm	mm	°C	J	J/cm ²	%
1	V	3,01	3,99	3,00	20	5,8	64,2	5,0
2	V	3,00	3,98	3,00	20	6,2	68,9	0,0
3	V	3,02	3,98	3,00	20	6,3	69,5	0,0
4	V	3,01	4,00	3,01	0	6,0	66,2	10,4
5	V	3,01	4,00	3,01	0	6,2	68,4	0,0
6	V	3,01	4,00	3,01	0	5,6	61,8	15,6
7	V	3,00	3,98	3,00	-20	1,9	21,1	4,1
8	V	3,01	4,00	3,00	-20	1,8	19,9	51,2
9	V	3,01	4,00	3,00	-20	3,9	43,2	6,9
10	V	3,00	3,99	3,02	-40	2,4	26,5	42,5
11	V	3,00	3,99	3,02	-40	1,9	21,0	48,3
12	V	3,00	4,00	3,00	-40	1,6	17,8	56,2
13	V	3,00	3,99	3,01	-100	0,6	6,6	89,4
14	V	3,00	3,99	3,01	-100	0,8	8,9	84,0
15	V	3,00	3,99	3,01	-100	1,2	13,3	53,3
16	V	3,00	4,00	3,01	-120	0,6	6,6	90,2
17	V	3,00	4,00	3,01	-120	0,4	4,4	91,4
18	V	3,00	4,00	3,01	-196	0,2	2,2	100,0

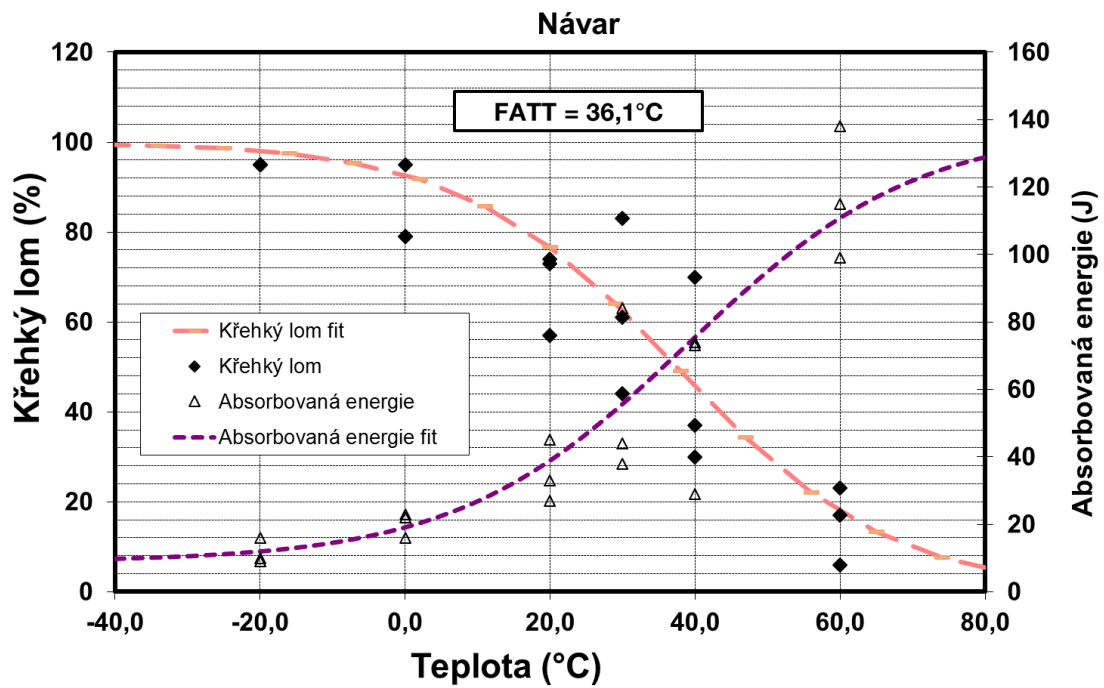


Obr. 94 Vyhodnocení přechodové teploty $FATT_{50}$ pro materiál ŠN 42 2747 pomocí mini Charpy

Hodnota přechodové teploty $FATT_{50}$ pro svarový spoj oblast TOO pomocí mini Charpy zkušebních těles byla a $-56,8^{\circ}\text{C}$. Teplotní posun mezi $FATT_{50}$ pro mini a standardní vzorky Δt je 60°C .

Tab. 28 Výsledky zkoušky rázem v ohybu – návar, standard

Vzorek	Vrub	Rozměry		Výška pod vrubem	Tepl.	KV ₂	KCV	BF
		w	h					
	V	mm	mm	mm	°C	J	J/cm ²	%
N_1	V	10,00	10,01	8,00	-20	9,0	11	95
N_2	V	10,00	9,99	8,00	-20	10,0	13	95
N_3	V	10,01	9,99	8,00	-20	16,0	20	95
N_4	V	10,02	9,98	7,99	20	45,0	56	73
N_5	V	10,00	9,98	7,99	20	33,0	41	57
N_6	V	9,99	9,99	8,00	20	27,0	34	74
N_7	V	10,00	10,01	7,99	40	29,0	36	70
N_8	V	10,01	10,00	7,99	40	73,0	91	37
N_9	V	10,01	10,01	7,98	40	74,0	93	30
N_10	V	10,02	10,00	8,00	60	115,0	143	23
N_11	V	10,01	10,00	8,00	60	138,0	172	6
N_12	V	10,01	10,00	8,01	60	99,0	123	17
N_13	V	10,00	10,01	7,99	0	22,0	28	79
N_14	V	10,00	10,00	7,98	0	23,0	29	79
N_15	V	10,02	10,01	8,01	0	16,0	20	95
N_16	V	10,01	9,99	8,00	30	84,0	105	44
N_17	V	9,98	10,00	8,00	30	38,0	48	61
N_18	V	9,99	10,00	8,01	30	44,0	55	83

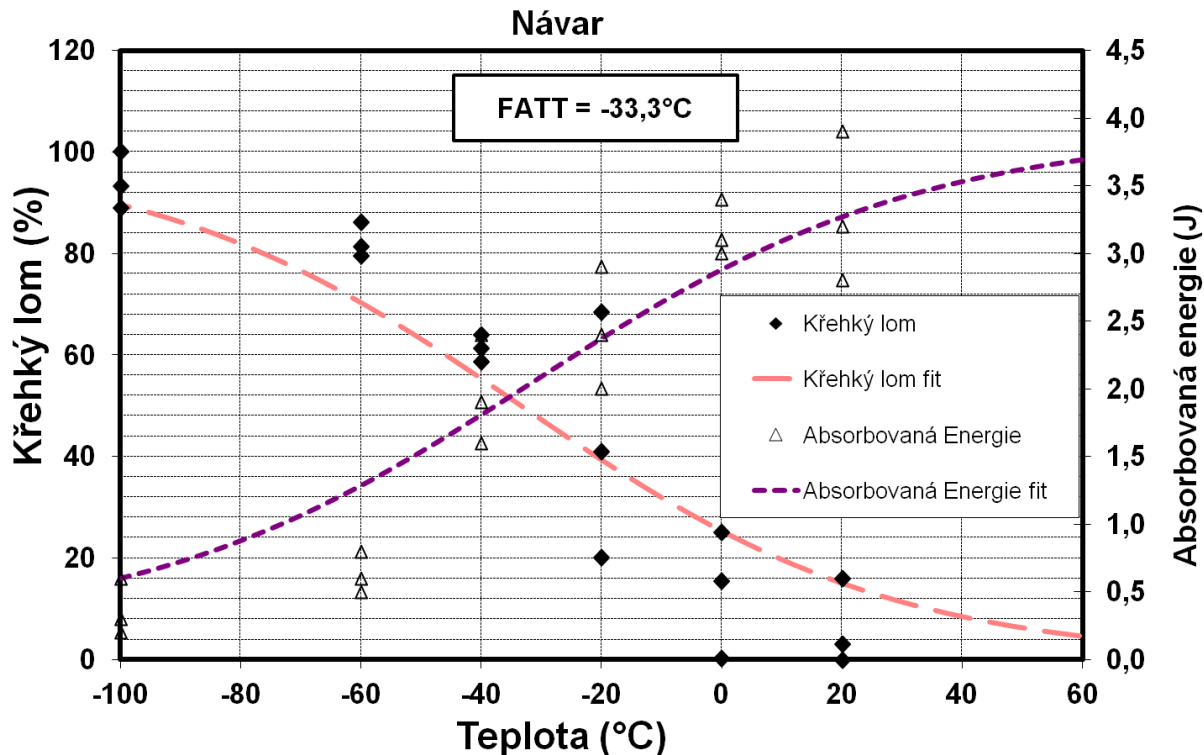


Obr. 95 Vyhodnocení přechodové teploty $FATT_{50}$ pro materiál ŠN 42 2747 pomocí Charpy

Hodnota přechodové teploty $FATT_{50}$ pro svarový spoj oblast návaru pomocí klasických zkušebních těles byla určena na 36,1°C.

Tab. 29 Výsledky zkoušky rázem v ohybu na mini Charpy pro svarový spoj oblast návaru

Vzorek	Vrub	Rozměry		Výška pod vrubem	Tepl.	KV ₂	KCV	BF
		w	h					
	V	mm	mm	mm	°C	J	J/cm ²	%
19	V	3,02	3,98	3,00	20	3,2	35,3	3,1
20	V	3,00	3,98	3,00	20	2,8	31,1	16,0
21	V	3,02	3,98	3,00	20	3,9	43,0	0,0
22	V	3,01	4,00	3,01	0	3,1	34,2	15,4
23	V	3,01	4,00	3,01	0	3,4	37,5	25,0
24	V	3,01	4,00	3,01	0	3,0	33,1	0,2
25	V	3,00	3,98	3,00	-20	2,9	32,2	68,4
26	V	3,01	4,00	3,00	-20	2,0	22,1	20,1
27	V	3,01	4,00	3,00	-20	2,4	26,6	41,0
28	V	3,00	3,99	3,02	-40	2,4	26,5	58,6
29	V	3,00	3,99	3,02	-40	1,9	21,0	61,3
30	V	3,00	3,99	3,02	-40	1,6	17,7	64,0
31	V	3,00	3,99	3,01	-60	0,6	6,6	79,5
32	V	3,00	3,99	3,01	-60	0,8	8,9	81,4
33	V	3,00	3,99	3,01	-60	0,5	5,5	86,1
34	V	3,00	4,00	3,01	-100	0,6	6,6	89,0
35	V	3,00	4,00	3,00	-100	0,3	3,3	100,0
36	V	3,00	4,00	3,01	-100	0,2	2,2	93,2



Obr. 96 Vyhodnocení přechodové teploty $FATT_{50}$ pro materiál ŠN 42 2747 pomocí mini Charpy

Hodnota přechodové teploty $FATT_{50}$ pro svarový spoj oblast návaru pomocí mini Charpy zkušebních těles byla určena na $-33,3^{\circ}\text{C}$. Posun v přechodových křivkách Δt je $59,6^{\circ}\text{C}$ pro oblast přechodu mezi základním materiálem a návarem označeným TOO a $69,4^{\circ}\text{C}$ pro oblast návaru.

9.4. Diskuze výsledků zkoušek rázem v ohybu pro stanovení tranzitní teploty FATT

Byly provedeny zkoušky rázem v ohybu pro stanovení tranzitní teploty FATT u tří vybraných materiálů. Původní záměr použít vzorky SPT byl prakticky neproveditelný z důvodu velké časové náročnosti výroby zkušebních disků (pro zajištění přesných rozměrů a kvality povrchu) a dále z velké časové náročnosti vlastního měření, kdy jsou teploty zkoušení pro dosažení křehkého lomu v oblastech pod -150°C). Navíc je pro měření a vyhodnocení SPT třeba spolupráce s metalografií, což dále vyhodnocení zkoušek prodlužuje. Proto byly provedeny zkoušky rázem v ohybu pouze na mini Charpy tělesech. Pro určení přechodové teploty $FATT_{50}$ bylo zpravidla použito 18 zkušebních těles, přičemž byly zkoušeny obvykle 3 vzorky na teplotě. Pro porovnání určených přechodových teplot $FATT_{50}$ ze standardních a vzorů mini charpy byl vypočítán posun křivek dle vztahu:

$$\Delta t = FATT_{50 \text{ standard}} - FATT_{50 \text{ mini}}$$

Tab. 30 Výsledky přechodové teploty $FATT_{50}$

Označení	$FATT_{50}$ standard	$FATT_{50}$ mini	Δt
	[°C]	[°C]	[°C]
Materiál 1	29,5	-32,0	61,5
Materiál 2	94,0	34,4	59,6
Materiál 3 TOO	2,8	-56,8	59,6
Materiál 3 Návar	36,1	-33,3	69,4
Průměr			62,5
Směrod. odchylka σ			4,4

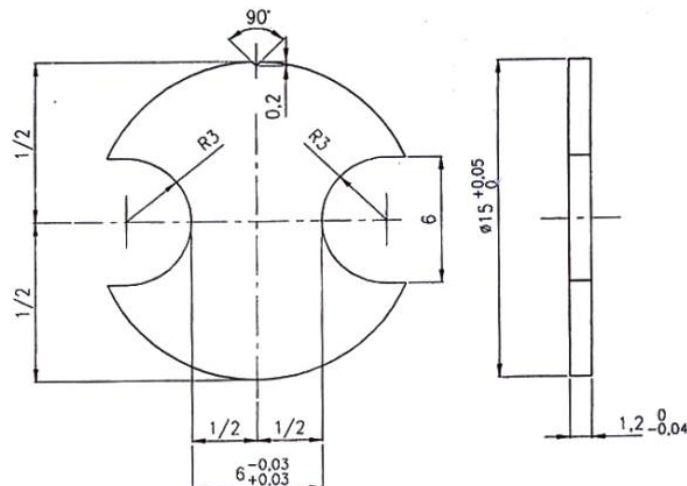
Ze souhrnu hodnot uvedených v **Tab. 30** je patrné, že v prvních třech případech je posun teploty Δt téměř identický a odpovídá výsledkům z literatury [79] i interní zkušenosti laboratoře. Byla dosažena vynikající shoda. Ve čtvrtém případě je hodnota posunu větší, ale oblast návaru byla specifická, každých několik vrstev návaru bylo opakovaně tepelně zpracovááno a každé místo mělo trochu jiné mechanické vlastnosti, což se potvrdilo i zkouškou tahem v různých místech návaru.

10. Experimentální část - Únava

Cílem této experimentální části práce bylo porovnání výsledků zkoušek vysokocyklové únavy získaných na různých typech zkušebních těles. Byly provedeny zkoušky únavy na standardních zkušebních tyčích, na vzorcích typu motýlek - Small Fatigue Test (SFT) a na mini vzorcích, viz **Obr. 97** až **Obr. 99**.



Obr. 97 Použité klasické zkušební tyče pro zkoušky únavy - aktivní část \varnothing 3mm

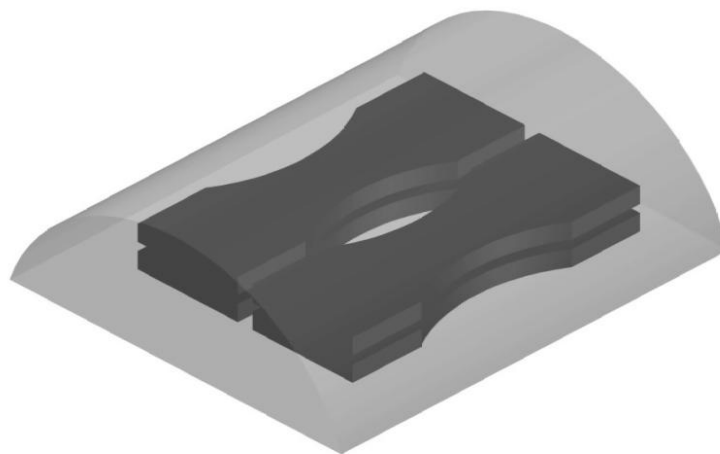


Obr. 98 Zkušební těleso pro zkoušku únavy, Small Fatigue Test [68]

Z vybraných materiálů byly vyrobeny standardní zkušební tyče, které mají průměr aktivní části $\varnothing 3\text{mm}$, upínací hlavy $M8 \times 1$ a byly vyrobené běžným obráběním. Povrch vzorků byl broušen, s dosaženou výslednou drsností $Ra=0,8$.

Vzorky typu motýlek SFT (Small Fatigue Test) pro zkoušky únavy měly vnější průměr 15mm, tloušťku 1,2mm a vybrání aktivní části $R=3\text{mm}$. Jedna sada vzorků měla vybrání vyrobená pomocí vodního paprsku, druhá sada elektrojiskrovým obráběním pro porovnání vlivu obrobeneho povrchu. Tento tvar zkušebního tělesa vychází z tvaru zkušebního vzorku odebraného odběrovým zařízením typu SSam. Výsledkem je ověření metodiky za použití tohoto již známého tvaru zkušebního tělesa na odlišných materiálech, vyhodnotit a porovnat s výsledky klasických zkušebních těles, případně stanovit korelační vztah.

Pro mini vzorky byl navržen tvar tělesa, který vychází z tvaru odebraného vzorku materiálu semi-destruktivním způsobem zařízením EDSE, tak aby bylo možné ze vzorku typu „lodička“ odebrat čtyři zkušební vzorky pro zkoušky únavy, **Obr. 99**. Jedná se o plochý vzorek s poloměrem vybrání $R=10$ resp. 15mm a tloušťkou 1,2mm.



Obr. 99 Příklad odebraného vzorek materiálu s umístěním zkušebních tyčí

10.1. Tvar zkušebního vzorku

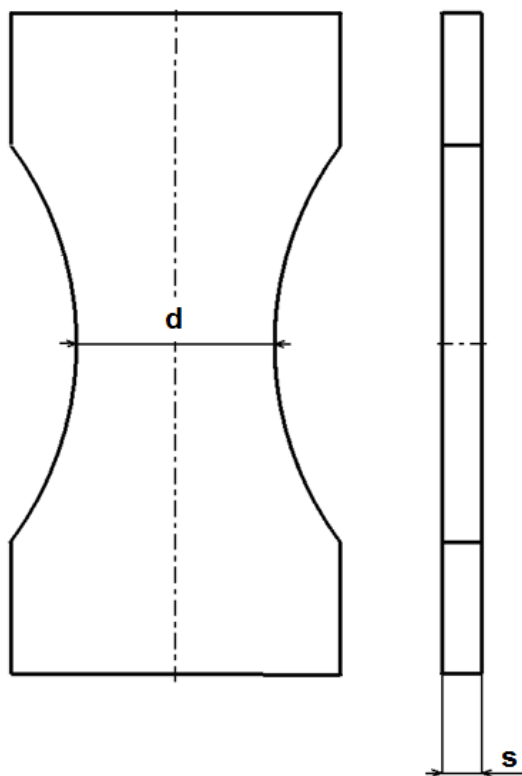
Pro nové navržené vzorky byla počítána koncentrace napětí. U klasických vzorků koncentraci napětí zanedbáváme. U malých vzorků Obr. 100 způsobuje geometrie zkušebního tělesa zvýšenou koncentraci napětí v kritickém průřezu. Byly vytvořeny MKP modely v programu COSMOS/M [81] pro určení a porovnání teoretických součinitelů koncentrace napětí (součinitel tvaru)

$$\alpha = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{nom}}}, \quad (40)$$

kde σ_{\max} - maximální napětí v průřezu určené z MKP modelu a
 σ_{nom} - nominální napětí dané vztahem

$$\sigma_{\text{nom}} = \frac{F}{d \cdot s}, \quad (41)$$

kde F - působící síla,
 d - šířka vzorku v kritickém místě,
 s - tloušťka vzorku.

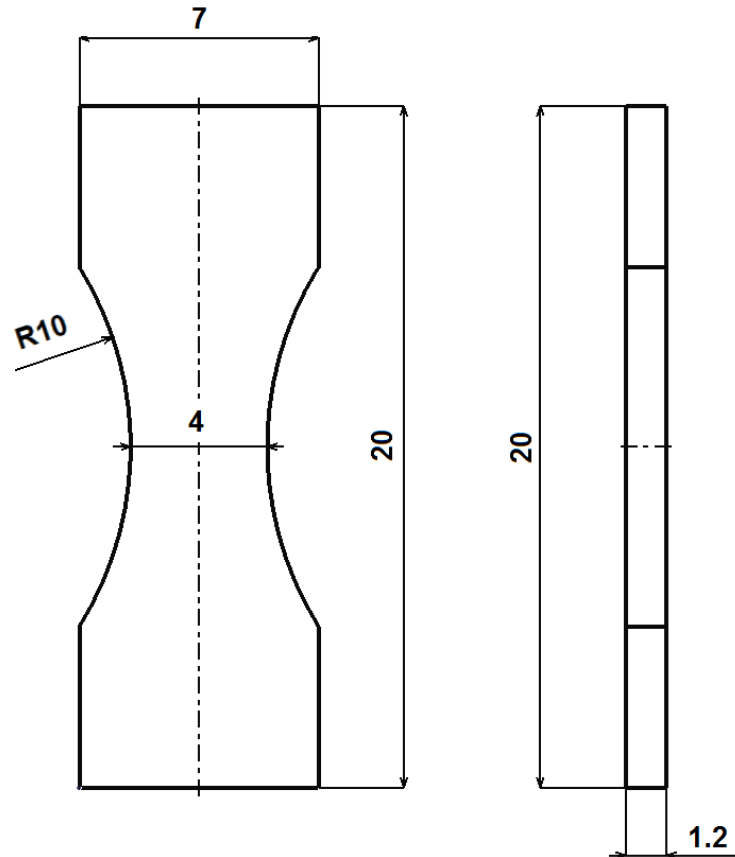


Obr. 100 Geometrie malého plochého vzorku pro zkoušky únavy

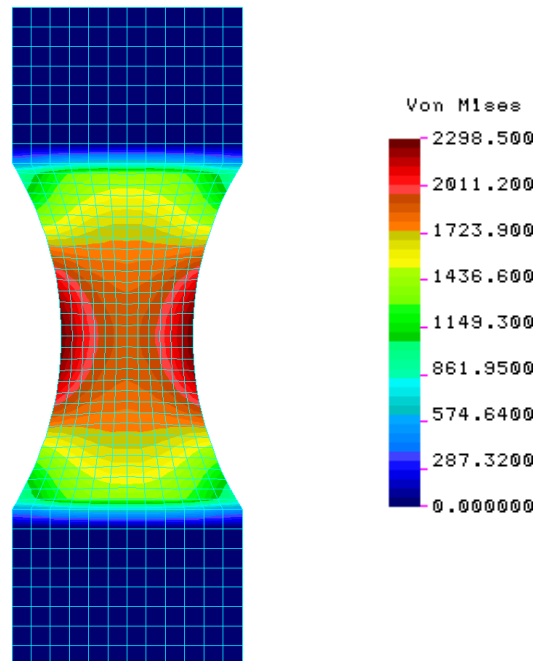
Nově navržené malé vzorky na **Obr. 101** a **Obr. 103** jsou samotným tvarem podobnější tvaru vzorku pro realizaci klasických únavových zkoušek.

Stanovení koncentrace napětí u vzorku 1

Pro daný vzorek **Obr. 101** bylo vypočteno na základě vztahu (40) nominální napětí $\sigma_{\text{nom}} = 2\,083.3$ MPa. Na základě MKP výpočtu **Obr. 102** bylo stanoveno maximální napětí v průřezu $\sigma_{\text{max}} = 2\,298.5$ MPa. Součinitel koncentrace napětí tohoto malého vzorku pro kritický průřez byl na základě vztahu (40) vypočten $\alpha = 1.103$.



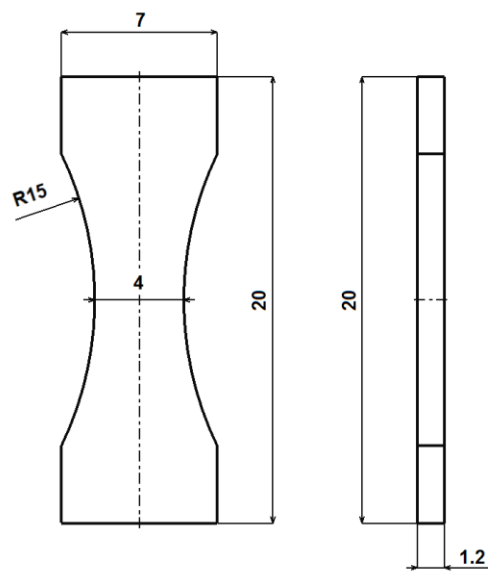
Obr. 101 Rozměr malého vzorku označeného R10



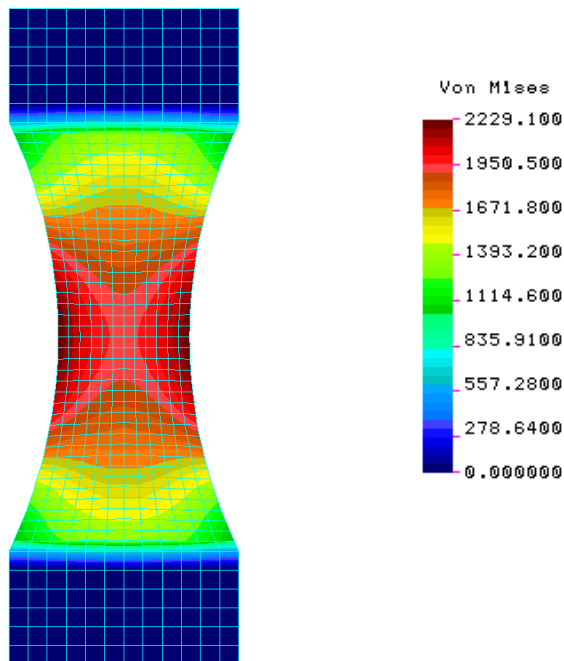
Obr. 102 Rozložení napětí na malém vzorku R10

Stanovení koncentrace napětí u vzorku 2

Pro daný vzorek **Obr. 103** bylo vypočteno na základě vztahu (40) nominální napětí $\sigma_{\text{nom}} = 2\,083.3$ MPa. Na základě MKP výpočtu Obr. 104 bylo stanoveno maximální napětí v průřezu $\sigma_{\text{max}} = 2\,229.1$ MPa. Součinitel koncentrace napětí tohoto malého vzorku pro kritický průřez byl na základě vztahu (41) vypočten $\alpha = 1.070$.



Obr. 103 Rozměr malého vzorku označeného R15



Obr. 104 Rozložení napětí na malém vzorku R15

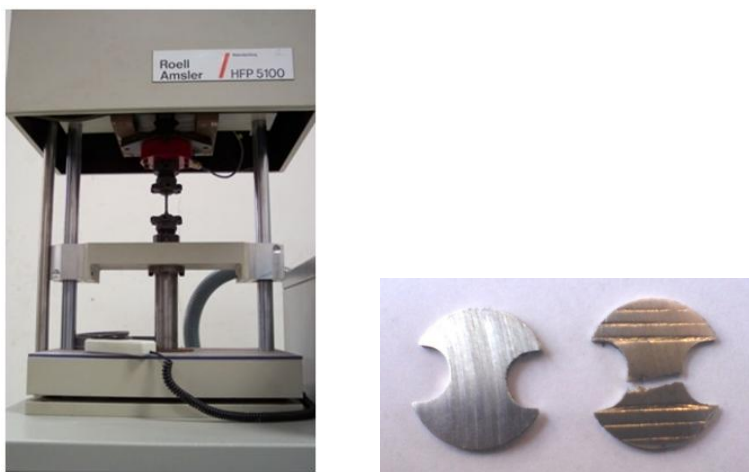
Součinitel koncentrace napětí byl použit pro odhadnutí síly potřebné k nakmitání malých vzorků tak, aby počet cyklů odpovídal vysokocyklové únavě (tj. více než 10^7 cyklů). Tato síla odpovídá síle F_{max} vypočtené z napětí σ_{max} přibližně rovného σ_{nom} klasických vzorků.

Součinitel koncentrace napětí je důležitý i pro následné tvoření korelací mezi zkouškami klasické únavy vs. únavy na malých vzorcích. Pro přepočítání použijeme vztah $\sigma_{R10kon}=1,07 * \sigma_{R10nom}$, kde σ_{kon} je koncentrace napětí na konkrétním vzorku vlivem vrubu a σ_{nom} je nominální napětí na vzorku. Hodnota koncentrace napětí je tedy 1,07 pro vzorek R10, 1,1 pro R15 a 1,33 pro SFT vzorek.

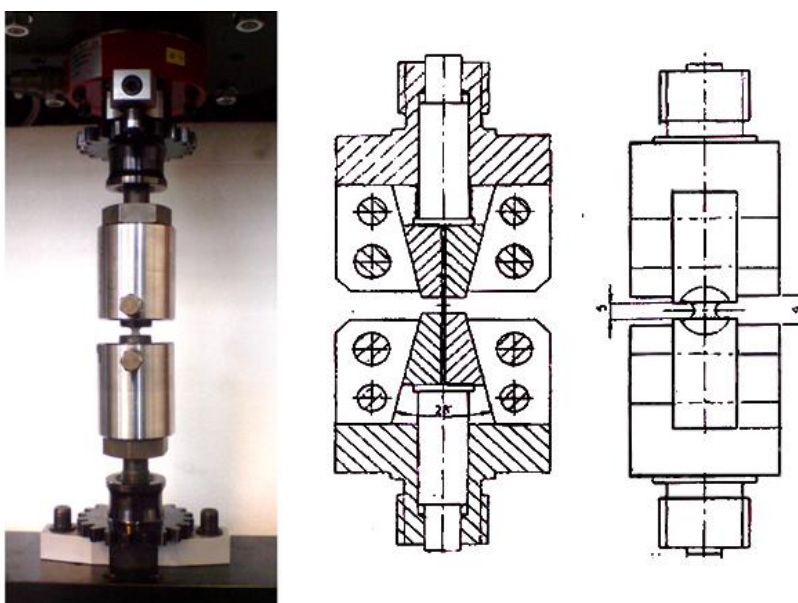
10.2. Provedení zkoušek únavy

V experimentální části byly pro provedení zkoušek vysokocyklové únavy vybrány tři materiály, které jsou podrobněji popsány v kapitole 7. Materiál číslo 1 je materiál pro výrobu lopatek T552, materiál je nedegradovaný a vzorky byly vyrobeny z již vyrobené lopatky. Druhým materiálem je nedegradovaný materiál 15Ch2NMFA. Třetím materiálem je svarový spoj – návar, oblast odběru byla jak v oblasti návaru, tak v oblasti přechodu základního materiálu a návaru.

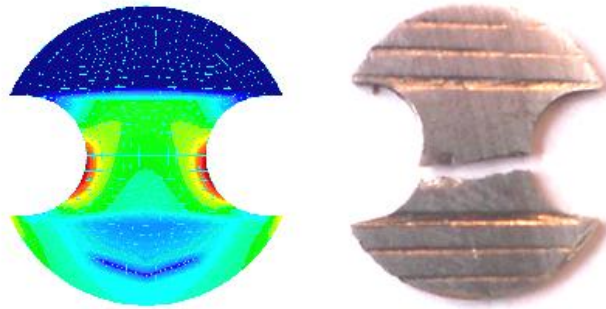
Test únavy byl prováděn na magneto-sonančním stroji Zwick/Roell – Amsler 10 HFP 5100 **Obr. 105** a to jak pro použití standardních, tak i miniaturních únavových zkušebních těles – Small Fatigue test a mini vzorků. V tom případě byly použity speciální upínací čelisti, **Obr. 106**.



Obr. 105: Vlevo vysokofrekvenční pulsátor Zwick/Roell – Amsler 10 HFP 5100, vpravo zkušební tělesa typ motýlek pro zkoušku únavy před a po porušení [80]



Obr. 106: Mechanické čelisti pro miniaturizované zkoušky, schéma čelistí, [80]



Obr. 107: Počítačová simulace únavového porušení miniaturních zkušebních těles v porovnání s realitou [80]

Výsledky zkoušek únavy jsou zpracovány do kapitol dle jednotlivých materiálů a do tabulek rozdělených dle typu zkušebních vzorků. Grafické porovnání je provedeno jako závislosti napětí na počtu cyklů do lomu - Wöhlerova křivka.

10.3. Výsledky zkoušek únavy materiál u T552

Všechny výsledky zkoušek jsou uvedeny v tabulce **Tab. 31** až **Tab. 33**. Nejprve byly provedeny zkoušky únavy na klasických vzorcích, byla určena časová mez únavy. Výsledky únavy v oblasti 10^2 až 10^5 cyklů vykazovaly velký rozptyl.

Tab. 31 Výsledky zkoušek únavy na klasických zkušebních tělesech

Poř. č.	Číslo vzorku	Napětí (MPa)	S (mm ²)	d(mm)	Počet cyklů do lomu
1	1	600,0	6,9	2,97	72511
2	2	550,0	6,8	2,95	186 651
3	3	530,0	6,9	2,96	1 022 525
4	4	520,0	6,8	2,95	112 558
5	5	510,0	6,8	2,95	121 629
6	6	500,0	6,7	2,93	363 728
7	7	480,0	6,8	2,94	521 348
8	8	460,0	6,8	2,94	10 000 000
9	9	470,0	6,9	2,96	551 019
10	10	465,0	6,7	2,93	1 224 016
11	11	460,0	7,2	2,94	10 000 000

V další fázi byly provedeny zkoušky únavy na tělesech typu motýlek - Small Fatigue Test. Výsledky vykazoval y rovněž značný rozptyl, navíc předpokládaný korelační vztah používaný v minulosti neodpovídal předpokládaným výsledkům. Navíc výsledky zkušebních těles, která měla tvar vyrobený pomocí drátořezu, byly horší než zkušební vzorky vyrobené vodním paprskem.

Tab. 32 Výsledky zkoušek únavy na zkušebních tělesech motýlek Small Fatigue Test vyrobených pomocí drátořezu

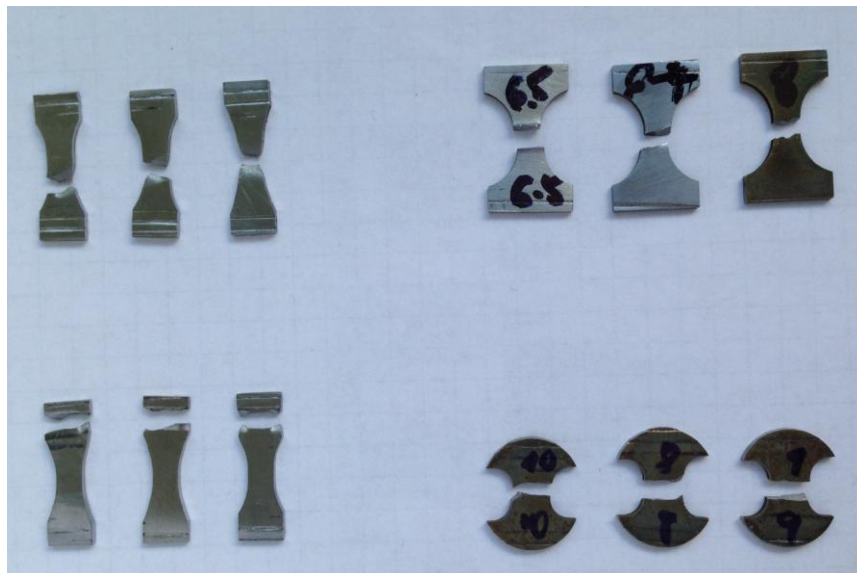
Poř. Č.	Číslo vzorku	Napětí (MPa)	S (mm ²)	axb(mm)	Počet cyklů do lomu
1	81DL_1	210,0	7,22	6,02x1,20	6 0843 69
2	81DL_2	230,0	7,25	6,04x1,20	4 243 064
3	81DL_3	250,0	7,21	6,01x1,20	331 589
4	81D_1	345,0	7,28	6,07x1,20	65 819
5	81D_2	345,0	7,28	6,02x1,21	68 415
6	81D_3	300,0	7,21	6,01x1,20	71 690
7	81D_4	350,0	7,20	6,02x1,19	140 756
8	81D_5	300,0	7,21	6,01x1,20	832 989
9	81D_6	400,0	7,21	6,01x1,20	46 819
10	81D_7	285,0	7,26	6,05x1,20	88 876
11	81D_8	338,0	7,28	6,02x1,21	86 141
12	81D_9	338,0	7,27	6,02x1,20	58 594
13	81D_10	345,0	7,25	6,04x1,20	119 177
14	81D_11	345,0	7,21	6,01x1,20	146 997
15	81D_12	285,0	7,25	6,04x1,20	277 773
16	81D_14	200,0	7,28	6,02x1,21	10 000 000
17	81D_15	250,0	7,21	6,01x1,20	1 604 541
18	81D_16	250,0	7,16	6,02x1,19	990 082
19	81D_17	230,0	7,21	6,01x1,20	891 676

Tab. 33 Výsledky zkoušek únavy na zkušebních tělesech motýlek Small Fatigue Test vyrobených pomocí vodního paprsku

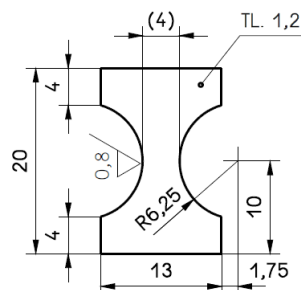
Poř. Č.	Číslo vzorku	Napětí (MPa)	S (mm ²)	axb(mm)	Počet cyklů do lomu
1	81P_5	260,0	2,96	6,04x0,49	10000000
2	81P_6	260,0	3,79	6,01x0,63	10 000 000
3	81P_4	270,0	3,10	6,07x0,51	8 500 459
4	81P_3	280,0	3,25	6,02x0,54	833 561
5	81P_7	290,0	3,24	6,01x0,54	546 897
6	81P_8	300,0	3,13	6,02x0,52	357 412
7	81P_9	310,0	3,06	6,01x0,51	112 564

V dalším kroku byla vyzkoušena nově navržená zkušební tělesa s poloměrem vybrání R15. Při vysokých hladinách zatěžování 410 až 380MPa zkušební tělesa praskala přesně uprostřed měřené délky, při dalším snižování hladiny zatěžování však docházelo k lomu v čelistech, zejména v prvním otlaku od vrubů v čelistech. Upínací plocha totiž na rozdíl od upínací plochy

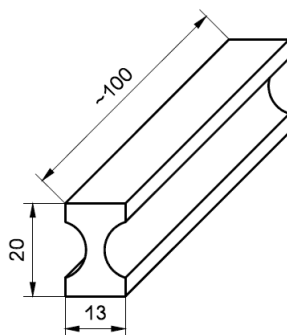
zkušebních vzorků typu motýlek má cca poloviční rozměr, **Obr. 108**. Pro další testování by bylo nutné navrhnout jiný typ upínacích kamenů do čelistí s jemnějším vroubkováním. Pro ověření vhodnosti navrženého typu zkušebního vzorku, byl vyroben polotovar s širší částí pro upnutí, viz **Obr. 109**. Po této úpravě už docházelo k lomu uprostřed vzorku, bohužel výsledky opět neodpovídaly předpokládanému korelačnímu faktoru, nicméně odpovídaly výsledkům typu motýlek.



Obr. 108 Zkušební vzorky po zkoušce únavy



POLOTOVAR PRO VÝROBU VZORKŮ



Obr. 109 Návrh nového zkušebního vzorku pro zkoušku únavy

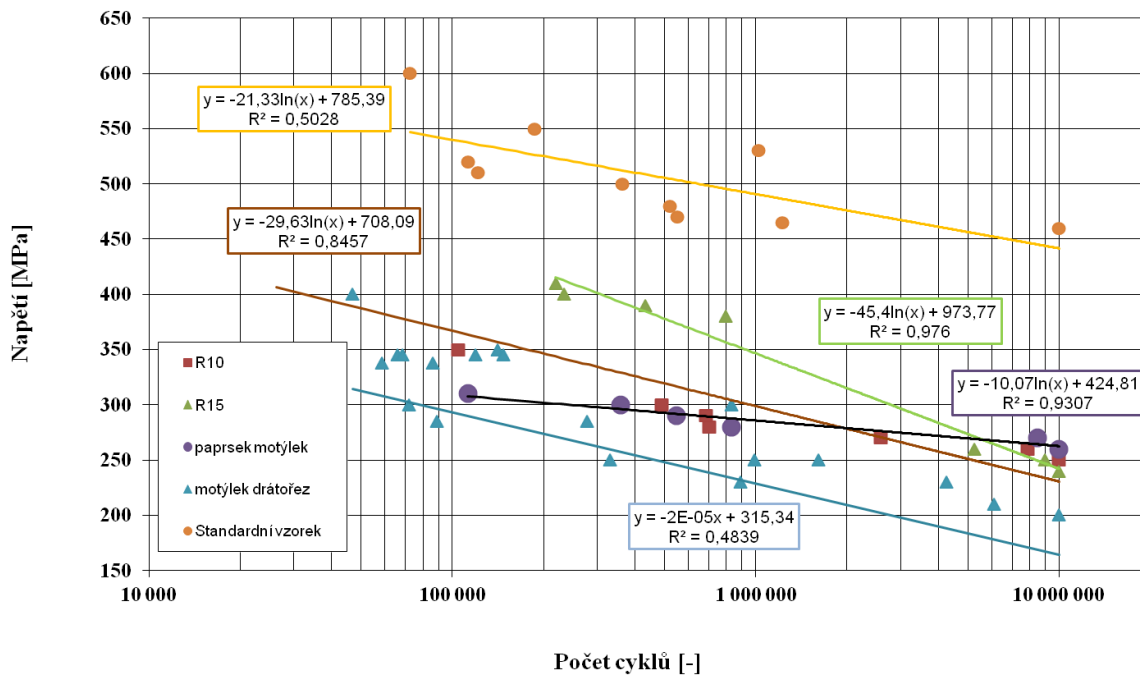
Tab. 34 Výsledky zkoušek únavy na nových zkušebních tělesech s vybráním R15

Poř. č.	Číslo vzorku	Napětí (MPa)	S (mm ²)	axb(mm)	Počet cyklů do lomu
1	81R15_10	260,0	4,97	1,18x3,96	5 263 113
2	81R15_9	380,0	4,35	1,12x3,88	794 032
3	81R15_8	390,0	4,24	1,09x3,89	431 693
4	81R15_3	400,0	4,41	1,13x3,90	233 849
5	81R15_1	410,0	4,45	1,15x3,87	219 089
6	81R15_12	250,0	4,66	1,18x3,95	8 948 561
7	81R15_11	240,0	4,66	1,18x3,95	10 000 000
8	81R15_12	230,0	4,72	1,19x3,97	10 000 000

Tab. 35 Výsledky zkoušek únavy na nových zkušebních tělesech s vybráním R10

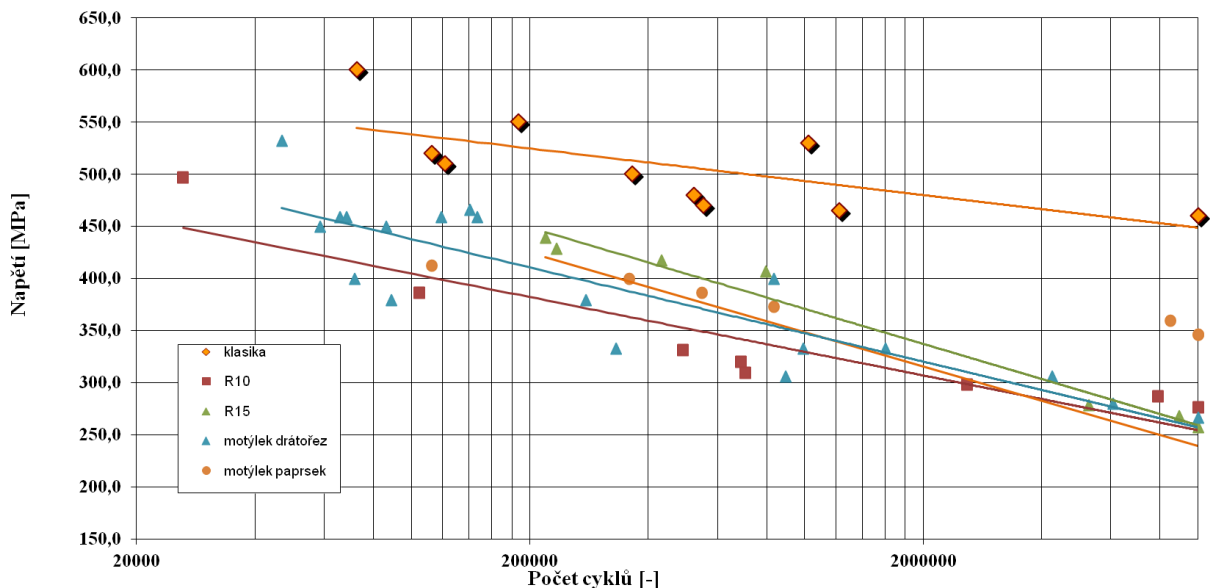
Poř. č.	Číslo vzorku	Napětí (MPa)	S (mm ²)	axb(mm)	Počet cyklů do lomu
1	81R10-2	450	4,46	1,15x3,88	26 247
2	81R10-3	350	4,41	1,13x3,90	104 597
3	81R10-4	300	4,43	1,14x3,89	488 350
4	81R10-5	290	4,49	1,15x3,90	685 852
5	81R10-6	280	4,45	1,14x3,9	704 636
6	81R10-7	270	4,37	1,12x3,9	2 578 413
7	81R10-8	260	4,24	1,09x3,89	7 895 261
8	81R10-9	245	4,35	1,12x3,88	10 000 000
9	81R10-10	250	4,66	1,18x3,95	10 000 000

Lopatka - výsledky bez přepočtu koncentrace



Obr. 110 Wöhlerova křivka z výsledků všech zkušebních tyčí bez přepočtu koncentrace napětí

Lopatka po přepočtu koncentrace napětí



Obr. 111 Wöhlerova křivka z výsledků všech zkušebních tyčí s přepočtem koncentrace napětí

Časová mez únavy byla stanovena pro jednotlivé zkušební vzorky v **Tab. 36**.

Tab. 36 Souhrn meze únavy pro jednotlivá zkušební tělesa

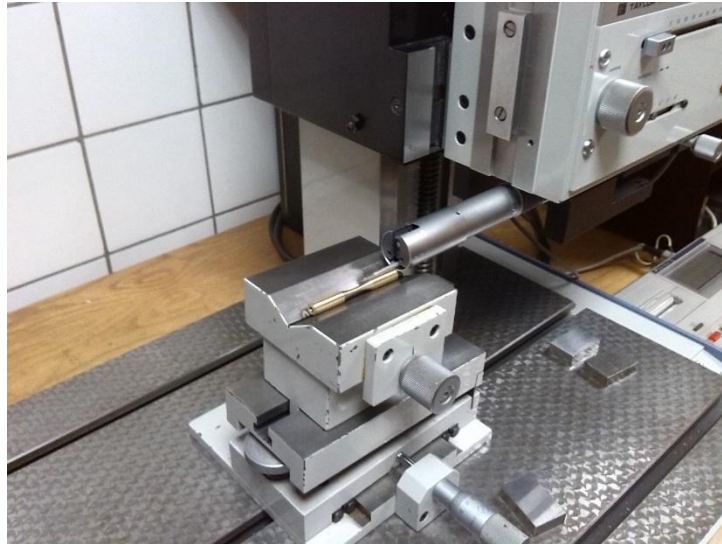
Druh vzorku	Mez únavy bez korelace [MPa]	Mez únavy s korelací [MPa]	Rozdíl oproti standardu [MPa]	Korelace z grafu
Standard $\varnothing 3$	460	460	0	0
Motýlek drátořez	266	200	o 260 méně	2,30
Motýlek paprsek	346	260	o 200 méně	1,77
Plochý R10	276	250	o 210 méně	1,84
Plochý R15	257	240	o 220 méně	1,92

Při porovnání výsledků zkoušek vysokocyklové únavy se nepotvrdily korelační vztahy, dokonce ani u vzorků typu motýlek, které v minulosti byly velmi dobře korelované pro materiál P92 [80]. Korelační koeficienty byly stanovené na 2,3 pro vzorky typu motýlek vyřezané drátořezem, 1,77 pro výrobu vodním paprskem (oproti výpočtu koncentrace napětí 1,33), 1,8 (oproti výpočtu koncentrace napětí 1,1) pro vzorky R10 a 1,9 (oproti výpočtu koncentrace napětí 1,07) pro vzorky R15.

Při provádění zkoušek vznikly problémy s uchycením vzorků R10 a R15, které byly velmi citlivé na vruby od upínacích čelistí, velkou část zkušebních vzorků bylo nutné vyřadit. Pro provádění

dalších zkoušek této geometrie, bude třeba inovovat upínací čelisti, zjemnit jejich povrch.

Pro zjištění příčiny velkého rozptylu výsledků byla měřena drsnost povrchu zkušebních vzorků **Obr. 112**.



Obr. 112 Příklad měření drsnosti na zkušebním vzorku

Vzorek č. 1 je standardní zkušební tyč průměru 3mm, vzorek č. 2 je zkušební těleso typu motýlek SFT, kde tvar je vyřezán na drátořezu, vzorek č. 3 je zkušební těleso typu motýlek SFT, kde tvar je vyřezán pomocí vodního paprsku **Obr. 113**, **Obr. 114**. Výsledky měření jsou uvedeny v **Tab. 37**.



Obr. 113 Vzorek č. 1 a místa měření drsnosti na zkušebním vzorku



Obr. 114 Vzorek č. 2,3 a místa měření drsnosti na zkušebním vzorku

Tab. 37 Výsledky měření drsnosti

Vzorek	Místo měření	Rz [μm]	Ra [μm]	Rp [μm]	Rt [μm]
1 Standardní vzorek	1	0,635	0,114	0,366	0,920
	2	0,645	0,105	0,337	0,770
	3	0,550	0,0879	0,308	0,590
	4	3,43	0,668	1,49	3,82
2 SFT drát	1	12,8	2,13	6,72	14,0
	2	13,0	2,19	6,74	14,3
3 SFT voda	1	0,380	0,0635	0,139	0,660
	2	2,14	0,417	0,950	2,97

Kde je:

Rz - největší výška profilu

Ra - průměrná aritmetická úchylka

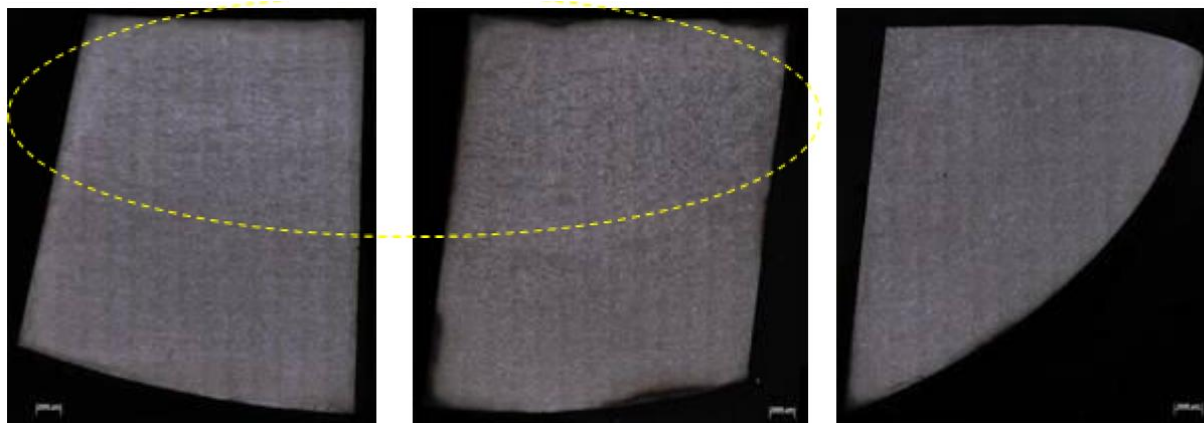
Rp - největší výška výstupku

Rt - celková výška profilu

Hodnoty drsnosti na kruhových vzorcích odpovídají $Ra=0,8$ pro klasická zkušební tělesa D 3mm. Vzorky řezané drátovou řezačkou na jeden průchod, ale i v menší míře vzorky řezané vodním paprskem, vykazují velké rozdíly mezi maximální a minimální hodnotou drsnosti. Tím by bylo možné vysvětlit jak velký rozptyl výsledků, tak i nízkou hodnotu meze únavy pro všechny zkušební vzorky, kde byl tvar vybrání vyřezán pomocí drátové řezačky na jeden průchod. Řešením je výroba vybrání na několik průchodů a finální broušení a leštění hrany zkušební vzorku. Z toho plyne, že přípravě zkušebních vzorků musí být věnována značná pozornost. Pro vyloučení vlivu nehomogenity vybraného materiálu byla provedena metalografická analýza na řezu lopatky, viz **Obr. 115**.

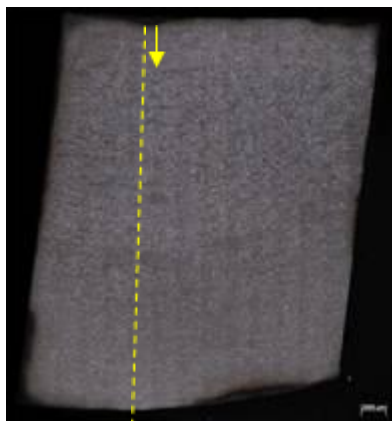


Obr. 115 Řez lopatkou s vyznačením míst pro hodnocení mikrostruktury



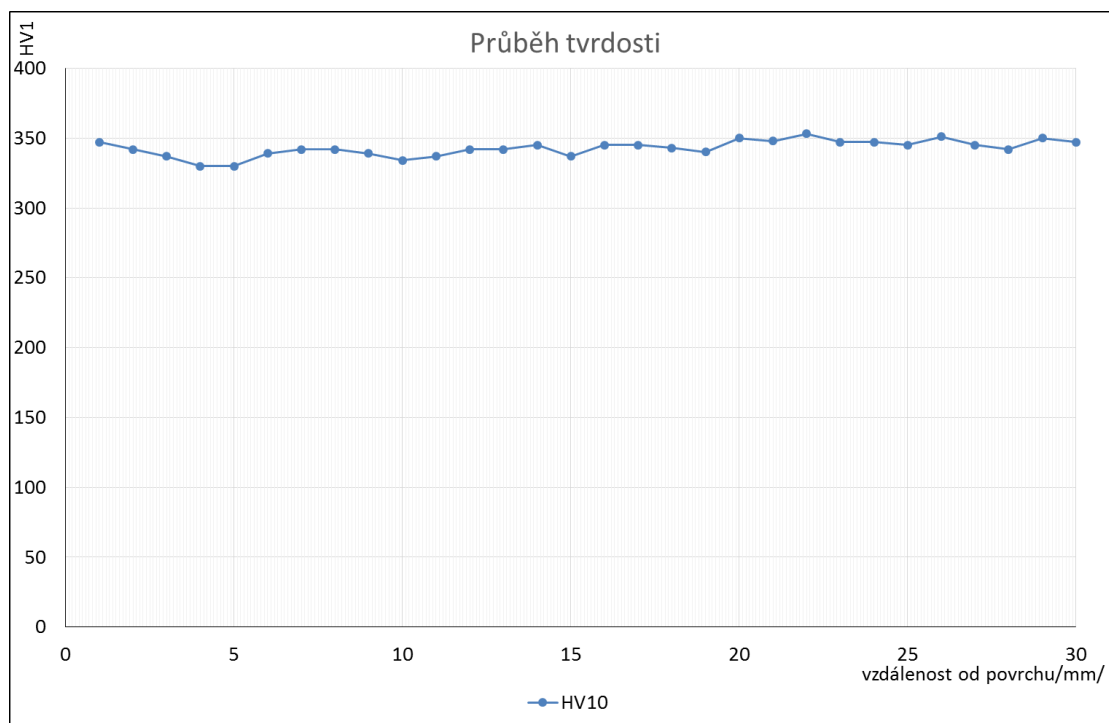
Obr. 116 Mikrostruktura míst označených 3, 2,1

Na naleptané lopatce (leptadlo Vilella Bain) nebyly vidět žádné zásadní rozdíly ve struktuře – struktura je popuštěný martenzit, neobsahuje delta ferit, nejsou patrné žádné vměstky, pouze střední část vykazuje hrubší strukturu – žlutě vyznačeno na **Obr. 116**



Obr. 117 Náčrt měření tvrdosti přes řez lopatky

Dále bylo ještě provedeno měření průběhu tvrdosti HV1 přes průřez lopatky. Ale ani v tomto případě nevykazoval materiál nějakou významnou odchylku **Obr. 117**, **Obr. 118**.



Obr. 118 Záznam měření tvrdosti HV1 přes průřez lopatky

10.4. Výsledky zkoušek únavy materiálu 15CH2NMFA

Všechny výsledky zkoušek z materiálu č. 2 jsou uvedeny v tabulce **Tab. 38** až **Tab. 41** Nejprve byly provedeny zkoušky únavy na klasických vzorcích, byla určena časová mez únavy. Jednalo se o ověření stanovených korelací malých vzorků pro asymetrii cyklu $R=0,1$.

Tab. 38 Výsledky zkoušek únavy na standardních zkušebních tělesech

Poř. č.	Číslo vzorku	Napětí (MPa)	S (mm ²)	d(mm)	Počet cyklů do lomu
1	CH_1	580,0	6,9	2,97	96 131
2	CH_2	520,0	6,9	2,95	358 169
3	CH_3	460,0	6,9	2,96	10 000 000
4	CH_4	460,0	6,8	2,95	10 000 000
5	CH_5	500,0	6,8	2,95	1 198 298
6	CH_6	480,0	6,7	2,93	4 151 261
7	CH_7	460,0	6,8	2,94	8 238 352
8	CH_8	540,0	6,8	2,94	659 742
9	CH_9	560,0	6,9	2,96	689 732
10	CH_10	470,0	6,7	2,93	3 568 498
11	CH_11	490,0	7,2	2,94	2 156 487

Dále byly provedeny zkoušky na tělesech s vybráním R10, R15 a SFT.

Tab. 39 Výsledky zkoušek únavy na zkušebních tělesech s vybráním R15

Poř. č.	Číslo vzorku	Napětí (MPa)	S (mm ²)	Rozměry (mm)	Počet cyklů do lomu
1	15CH_6	250,0	3,99	1,07x3,73	10 000 000
2	15CH_4	260,0	4,83	1,21x3,99	2 770 874
3	15CH_1	300,0	4,81	1,21x3,98	224 933
4	15CH_9	280,0	4,63	1,18x3,93	659 781
5	15CH_5	290,0	4,63	1,17x3,96	950 482
6	15CH_2	290,0	4,64	1,19x3,90	498 726
7	15CH_7	270,0	4,57	1,15x3,97	1 458 975
8	15CH_8	310,0	4,59	1,16x3,96	97 466
9	15CH_3	280,0	4,46	1,16x3,85	1 456 798
10	15CH_10	250,0	4,64	1,17x3,97	10 000 000

Tab. 40 Výsledky zkoušek únavy na zkušebních tělesech s vybráním R10

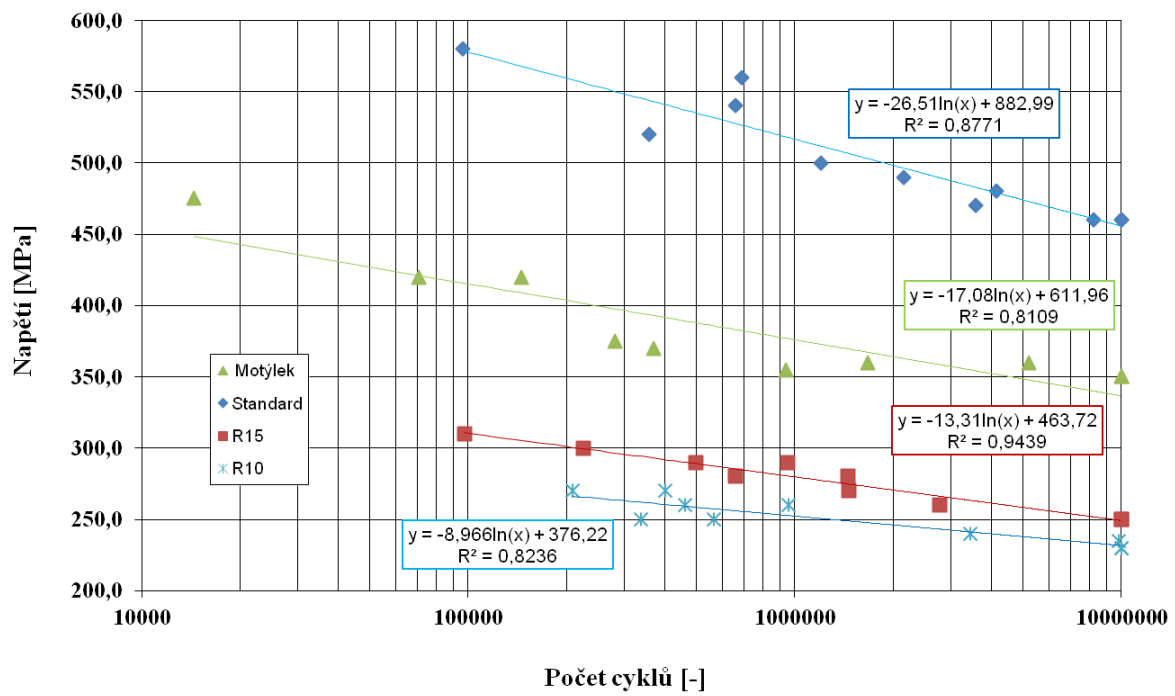
Poř. č.	Číslo vzorku	Napětí (MPa)	S (mm ²)	Rozměry (mm)	Počet cyklů do lomu
1	10CH_9	235	4,32	1,09x3,96	9 808 617
2	10CH_3	230	4,52	1,15x3,93	10 000 000
3	10CH_1	230	4,55	1,15x3,96	10 000 000
4	10CH_10	240	4,28	1,08x3,96	3 446 876
5	10CH_8	250	4,28	1,08x3,96	337 925
6	10CH_4	260	4,54	1,15x3,95	956 412
7	10CH_5	270	4,39	1,12x3,92	208 562
8	10CH_2	250	4,48	1,14x3,93	564 972
9	10CH_6	260	4,34	1,10x3,95	459 731
10	10CH_7	270	4,47	1,13x3,96	401 298

Tab. 41 Výsledky zkoušek únavy na zkušebních tělesech SFT

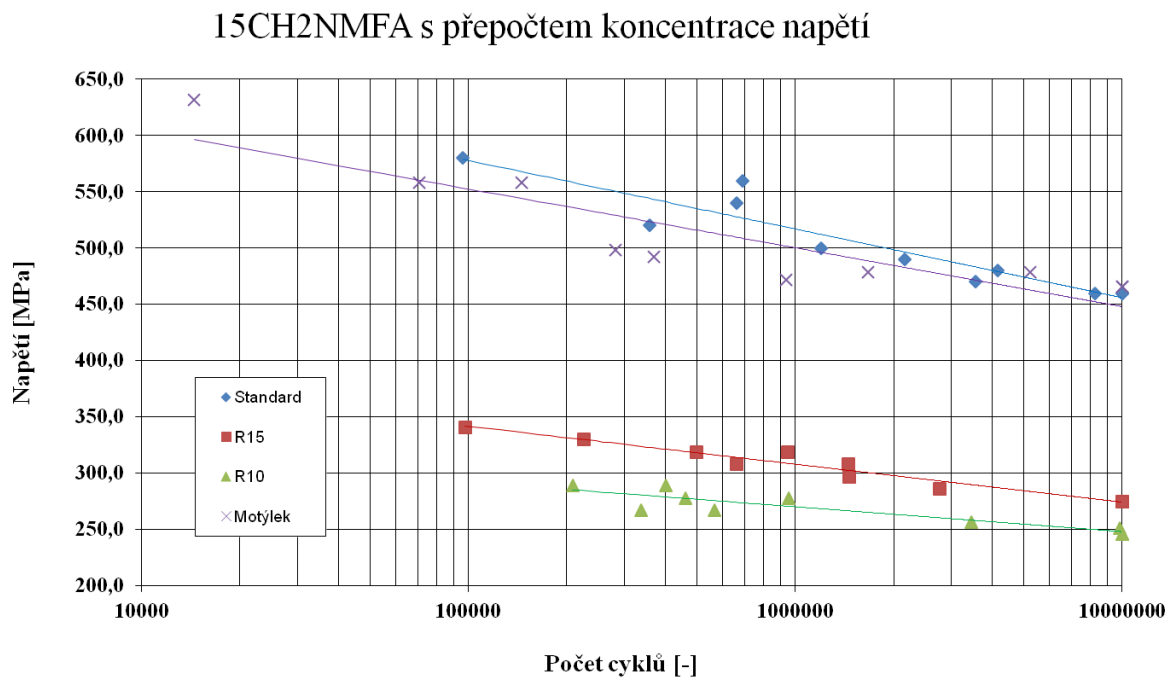
Poř. č.	Číslo vzorku	Napětí (MPa)	S (mm ²)	d(mm)	Počet cyklů do lomu
1	SFT_1	475,0	9,08	1,51x6,01	14476
2	SFT_2	420,0	9,00	1,50x6,00	70 505
3	SFT_3	420,0	9,04	1,51x5,99	145 670
4	SFT_4	375,0	9,00	1,50x6,00	281 952
5	SFT_5	370,0	9,08	1,51x6,01	368 636
6	SFT_6	360,0	9,08	1,51x6,01	1 667 035
7	SFT_7	355,0	9,08	1,51x6,01	939 568
8	SFT_8	360,0	9,04	1,51x5,99	5 216 213
9	SFT_9	350,0	8,99	1,50x5,99	10 000 000
10	SFT_10	350,0	9,0	1,51x5,99	10 000 000

Výsledky ze všech provedených testů jsou v grafické formě uvedeny na **Obr. 119** bez přepočtu, na **Obr. 120** s přepočtem dle stanovených korelačních vztahů.

15CH2NMFA bez přepočtu



Obr. 119 Wöhlerova křivka z výsledků všech zkušebních tyčí bez přepočtu koncentrace napětí



Obr. 120 Wöhlerova křivka z výsledků všech zkušebních tyčí s přepočtem koncentrace napětí

Tab. 42 Stanovení meze únavy

Druh vzorku	Mez únavy [MPa]	Mez únavy s korelací [MPa]	Rozdíl oproti standardu [MPa]	Korelace
Standard ø3	460	460	0	0
Motýlek drátořez	350	466	0	1,33
Plochý R10	230	246	o 230 méně	1,87
Plochý R15	250	275	o 210 méně	1,67

U druhého materiálu 15CH2NMFA byl potvrzen korelační vztah 1,33 pro použití vzorků typu motýlek SFT, bohužel u vzorků R10 i R15 byl experimentálně určen korelační vztah 1,87 oproti vypočtenému 1,1 a u vzorku R10 1,67 oproti 1,07.

10.5. Výsledky zkoušek únavy materiálu 16 236+návaru

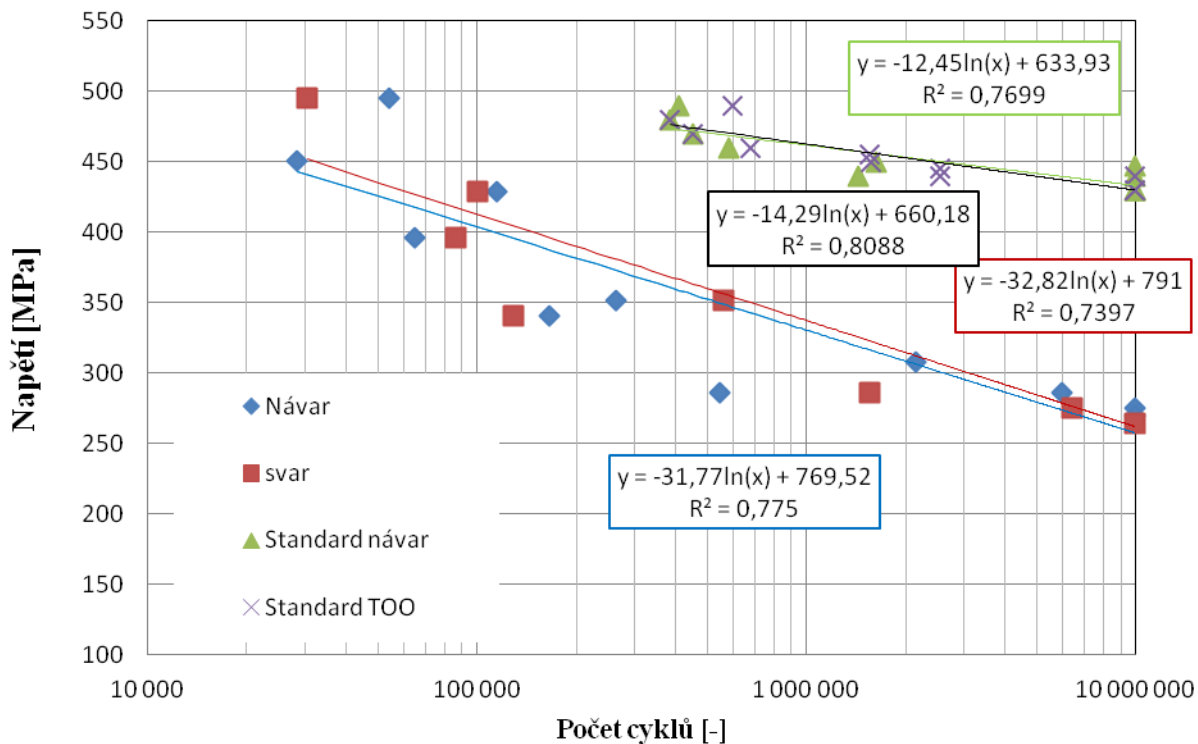
Pro stanovení meze únavy byla na materiálu č. 3 vybrána oblast návaru a tepelně ovlivněné oblasti TOO, aby vzorek byl umístěn tak, že linie svaru bude uprostřed zkušebního vzorku. Výsledky jednotlivých zkoušek jsou uvedeny v tabulkách **Tab. 43** až **Tab. 45**. Zajímavostí bylo, že výsledky zkoušek jednotlivých oblastí byly téměř identické jak při použití klasických zkušebních tyčí i vzorků R15.

Tab. 43 Výsledky zkoušek únavy na zkušebních tělesech R15 pro oblast TOO

Poř. číslo	Rozměr [mm]	Rozměr [mm]	S [mm ²]	Napětí [MPa]	Počet cyklů do lomu [-]	Označení vzorku
1	3,98	1,17	4,66	450	54 450	6-1
2	3,99	1,17	4,67	390	115 097	6-2
3	3,98	1,17	4,66	250	10 000 000	6-3
4	3,99	1,17	4,67	360	65 171	6-4
5	3,98	1,16	4,62	310	166 554	6-5
6	3,98	1,17	4,66	260	548 038	6-6
7	3,97	1,18	4,68	320	265 401	6-7
8	3,98	1,18	4,70	410	28 588	6-8
9	3,98	1,18	4,70	245	10 000 000	6-9
10	3,97	1,18	4,68	260	5 961 203	6-10
11	3,98	1,18	4,70	280	2 150 469	6-11

Tab. 44 Výsledky zkoušek únavy na zkušebních tělesech R15 pro oblast návaru

Poř. číslo	Rozměr [mm]	Rozměr [mm]	S [mm ²]	Napětí [MPa]	Počet cyklů do lomu [-]	Označení vzorku
1	3,99	1,15	4,59	450	30 524	7_1
2	3,97	1,13	4,49	390	100 648	7_2
3	3,99	1,13	4,51	240	10 000 000	7_3
4	3,98	1,17	4,66	360	86 288	7_4
5	3,97	1,18	4,68	310	129 710	7_5
6	3,99	1,18	4,71	260	1 564 872	7_6
7	3,98	1,18	4,70	320	564 288	7_7
8	3,99	1,17	4,67	250	6 421 892	7_8
9	3,99	1,18	4,71	240	10 000 000	7_9
10	3,98	1,19	4,74	270	1 256 897	7_10



Obr. 121 Wöhlerova křivka z výsledků všech zkušebních tyčí bez přepočtu koncentrace napětí

Tab. 45 Výsledky zkoušek únavy materiálu č. 3 – návar

Druh vzorku	Mez únavy [MPa]	Mez únavy s korelací [MPa]	Rozdíl oproti standardu [MPa]	Korelace
Standard ø3	430	430	0	0
Návar R15	250	275	o 155 méně	1,56
Svar R15	240	264	o 166 méně	1,63

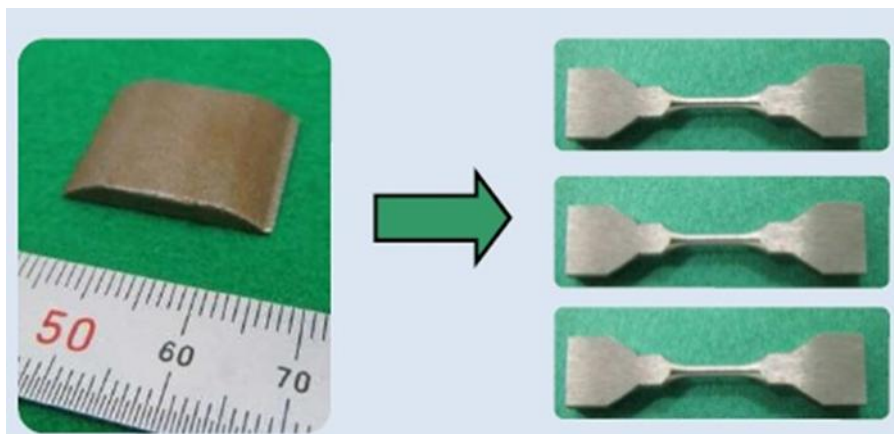
Při porovnání výsledků zkoušek únavy byl stanoven korelační vztah 1,56 pro oblast návaru pro vzorek R15 a 1,63 pro oblast svaru – TOO u vzorek R15, oproti vypočtenému vztahu 1,1.

10.6. Ověření velikostního faktoru

Na základě získaných výsledků, kdy byl dosažen velký rozptyl naměřených hodnot a soulad s hodnotami naměřenými na standardních vzorcích byl neuspokojivý, byla navržena nová geometrie zkušebního vzorku. Pro odstranění potíží s upnutím a nekvalitním povrchem bylo navrženo zcela odlišné těleso, které má aktivní část $\varnothing 1,5\text{mm}$ a lze ho také vyrobit z odebraného zkušebního vzorku semi-destruktivním odběrem EDSE, viz Obr. 122, Obr. 123.

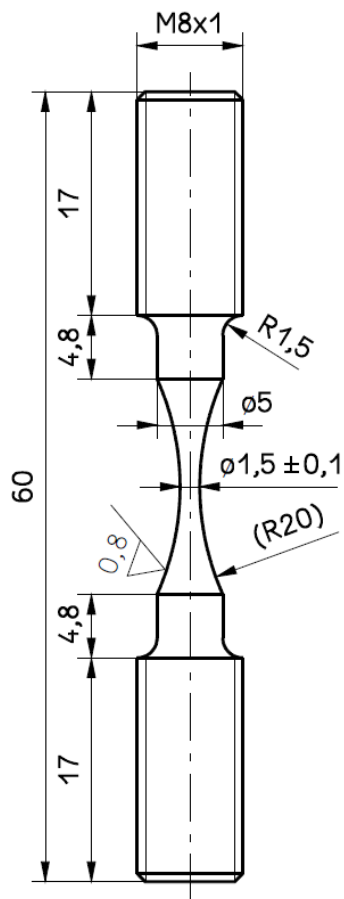


Obr. 122 Tvar zkušebního tělesa



Obr. 123 Vzorek typu lodička a tvar miniaturních zkušebních těles

Protože pro navržené zkušební těleso by bylo nutně navrhnout a vyrobit a odzkoušet upínací přípravek, bylo navrženo zkušební těleso tak, že střední část reprezentuje průměr 1,5mm, na koncích je vzorek opatřen upínací hlavou se závitem M8x1 tak, aby ho bylo možné upnout do stávajících čelistí zkušebního stroje, viz Obr. 124. Tím se vyloučí chyby vzniklé nepřesným upnutím. Protože v případě plochého zkušebního tělesa, kdy stávající čelisti nemají žádnou pevnou, přesně danou polohu pro upnutí, záleží na pečlivosti obsluhy při upínání. Při použití kruhového zkušebního tělesa se vyloučí případný přídatný ohyb, zajistí se souosost.



Obr. 124 Tvar zkušebního kruhového vzorku

Pro ověření velikostního faktoru byly vyrobeny z materiálu 16 343 sady zkušebních vzorků o průměru 1,5, 4, 8, a 12mm a byly provedeny zkoušky únavy, viz **Obr. 125**. Výsledky jednotlivých zkoušek únavy jsou uvedeny v **Tab. 46**.



Obr. 125 Zkušební tělesa o průměru zleva 1,5, 4, 8, a 12mm

Tab. 46 Výsledky zkoušek únavy na standardních zkušebních tělesech různých průměrů

Zkušební tyč D=1,5mm

R= -1

D₀ (mm)	S₀ (mm²)	σ_a (MPa)	Počet cyklů	Vzorek
1,50	1,77	700		
1,48	1,72	600		
1,53	1,84	580		
1,46	1,67	550		
1,53	1,84	540		
1,53	1,84	540		

Zkušební tyč D=4mm R= -1

D₀	S₀	σ_a	Počet cyklů	Vzorek
(mm)	(mm²)	(MPa)		
4,00	12,57	550	898 281	D4_1
4,00	12,57	520	10 000 000	D4_4
4,00	12,57	525	10 000 000	D4_5

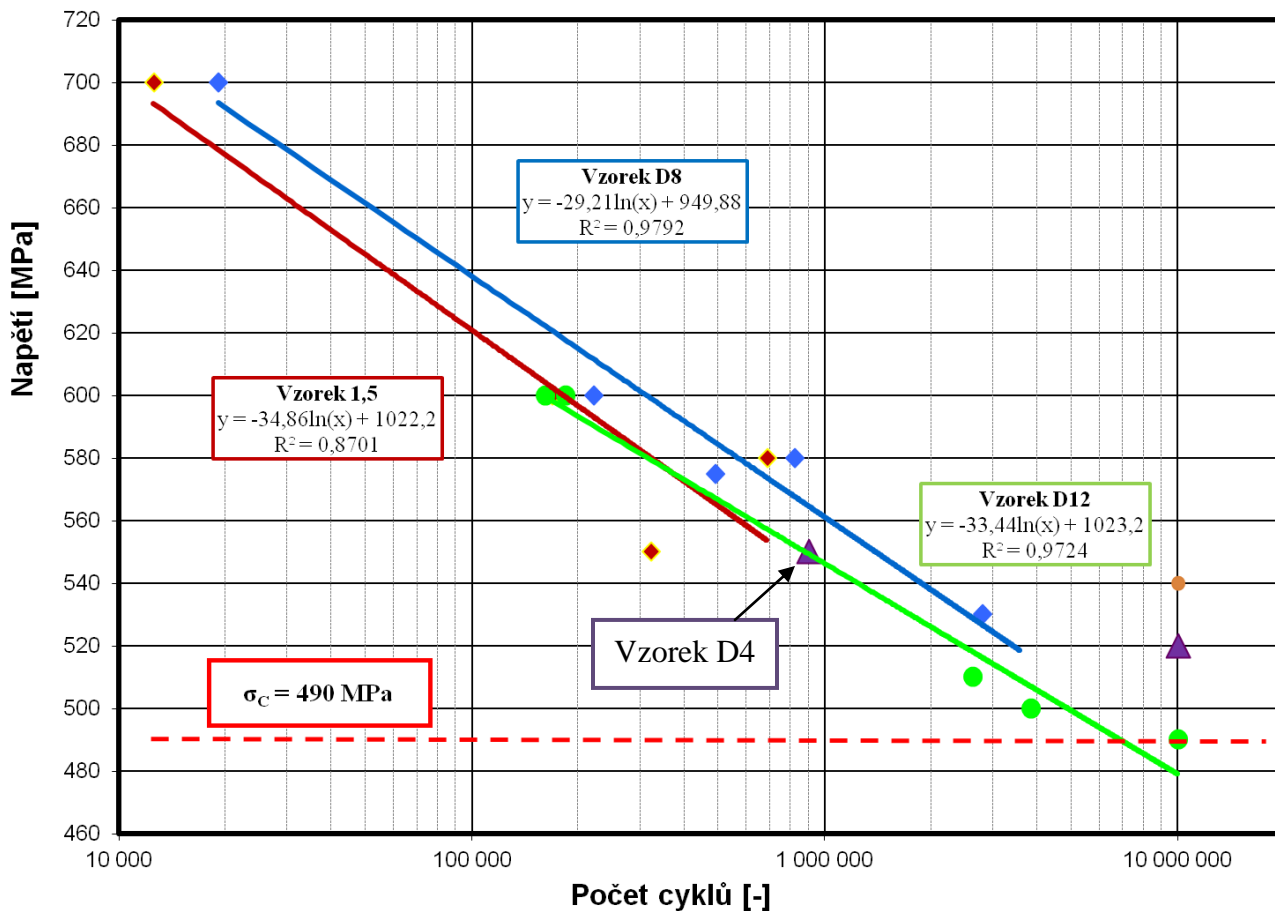
Zkušební tyč D=8mm R= -1

D₀	S₀	σ_a	Počet cyklů	Vzorek
(mm)	(mm²)	(MPa)		
8,00	50,27	700	19 090	D8_1
8,00	50,27	575	489 082	D8_3
8,01	50,39	580	821 365	D8_4
8,00	50,27	600	221 124	D8_5
8,00	50,27	530	2 783 824	D8_8
8,00	50,27	540	10 000 000	D8_11
8,00	50,27	540	10 000 000	D8_12

Zkušební tyč D=12mm R= -1 20°C

D₀	S₀	σ_a	Počet cyklů	Vzorek
(mm)	(mm²)	(MPa)		
12,00	113,10	600	183 816	D12_1
12,00	113,10	600	160 946	D12_11
12,00	113,10	510	2 625 667	D12_5
12,00	113,10	500	3 827 440	D12_4
12,00	113,10	490	10 000 000	D12_7
13,00	132,73	490	10 000 000	D12_14

Grafický záznam výsledků zkoušek je na **Obr. 126**.



Obr. 126 Grafický záznam výsledků všech zkušebních tyčí

Přesto, že ještě nebyly dokončeny celé sady zkušebních vzorků, z grafu výsledků zkoušek únavy je patrný shodný charakter směrnice výsledků, viz **Obr. 126**, a bylo možné předběžně stanovit mez únavy pro jednotlivé použité zkušební tyče, viz **Tab. 47**.

Tab. 47 Výsledky zkoušek únavy na standardních zkušebních tělesech

Vzorek	Mez únavy [MPa]
D1,5	540
D4	525
D8	540
D12	490

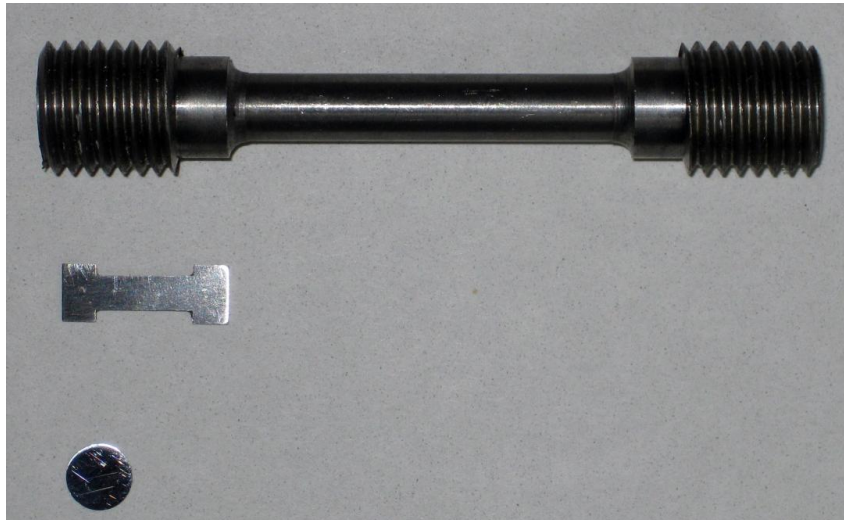
10.7. Diskuze výsledků zkoušek únavy

Pro porovnání výsledků zkoušky únavy na vybraných materiálech bylo provedeno 30ks zkoušek na standardních zkušebních tyčích, 35ks zkoušek na mini vzorcích SFT typu motýlek a 59ks zkoušek na nově navržených zkušebních tělesech označených R10 a R15, dle vybrání ve střední části vzorku, dále 8 zkoušek na kruhovém tělese o průměru 1,5mm v aktivní části. Před započítáním zkoušek byla u nové navržených zkušebních vzorků provedena počítačová simulace metodou konečných prvků pro určení koncentrátoru napětí v kritickém průřezu. Byly stanoveny předpokládané korelační koeficienty pro jednotlivé typy vzorků. Výsledky experimentálních zkoušek nepotvrdily tyto výpočtové korelace a korelační vztahy byly určeny experimentálně z výsledků provedených zkoušek pro každý materiál. Ze souboru zkoušek bylo zřejmé, že výsledky všech použitých malých vzorků byly podobné. Bylo potvrzeno, že na mez únavy zejména u malých vzorků typu motýlek, R10, R15 má výrazný vliv výroba zkušební tělesa a je proto potřeba zajistit výrobu tvaru těla zkušební tělesa s co nejmenším ovlivněním materiálu, např. několika průchody drátové řezačky, ale s co největší kvalitou povrchu, případně ještě zajistit závěrečné broušení popř. leštění. U plochých vzorků po sérii neúspěšných pokusů byl proveden experiment s doleštěním hran vzorku před založením zkoušky, ale pravděpodobně byla již plocha natolik ovlivněna výrobou vybrání, že ani finální leštění nemohlo povrch zlepšit. Pro ověření vlivu velikostního faktoru na výsledky meze únavy byly vyrobeny z materiálu 16 343 sady zkušebních vzorků o průměru 1,5, 4, 8, a 12mm a byly provedeny zkoušky únavy. Zkoušky ještě pokračují, přesto je možné z grafu výsledků zkoušek únavy sledovat shodný trend výsledků a bylo možné stanovit časovanou mez únavy pro jednotlivé použité zkušební vzorky.

Jako nejvhodnější do budoucnosti se jeví z hlediska výroby i přesnosti upínání, použití kruhových zkušebních tyčí o průměru 1,5mm, které lze vyrobit ze vzorku odebraného semi destruktivním odběrem. U těchto vzorků byl na omezeném souboru dat nalezen velmi dobrý souhlas mezi výsledky měření na vzorcích s různými průměry bez využití jakýchkoliv korelačních přepočtových vztahů.

11. Experimentální část - CREEP

Cílem této experimentální části práce, bylo provést zkoušky tečení na klasických zkušebních tyčích, na vzorcích typu Small Punch Test a na nově navržených mini vzorcích. Viz. **Obr. 127**. Tvar mini zkušebního tělesa byl navržen tak, aby ho bylo možné vyrobít i z odebraného vzorku semi-destruktivním odběrem metodou EDSE, vzorek typu lodičky (boat sample).



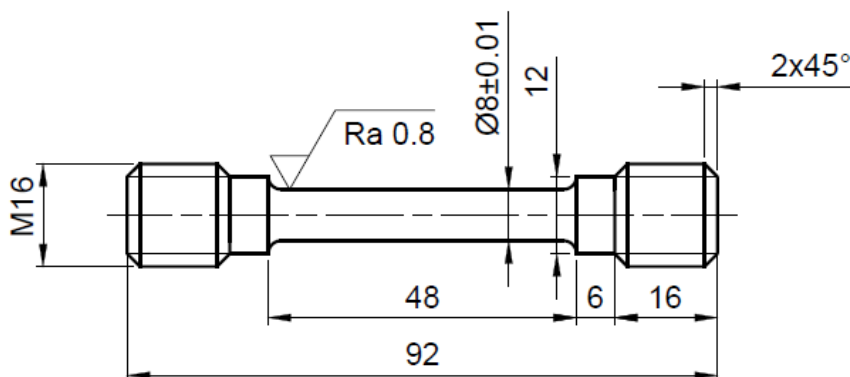
Obr. 127 Použité zkušební vzorky pro zkoušky tečení

Pro provedení zkoušek tečení byly vybrány tři materiály. Materiál číslo 1 je z parovodu po provozu, materiál 15 128.5 a byl vybrán z toho důvodu, že reprezentuje obvyklý požadavek provozovatele, zda komponentu lze dále provozovat a jak dlouho, tedy určení zbytkové životnosti pomocí zkoušek tečení. Druhým materiálem je také materiál po provozu, ale jedná se o litý materiál, ocel na odlitky ŠN 42 2747. Komponentou je vnitřní těleso skříně, která již byla vyřazena z provozu a tento materiál je cenný pro stanovení míry degradace, kdy lze porovnat mechanické zkoušky degradovaného materiálu a výchozího stavu materiálu. Může to být také podklad pro různé simulace degradace v průběhu životnosti materiálu.

Třetím materiálem je neprovozovaný svarový spoj – návar, oblast odběru byla jak v oblasti návaru, tak v oblasti přechodu základního materiálu a návaru.

11.1. Metodika zkoušek tečení

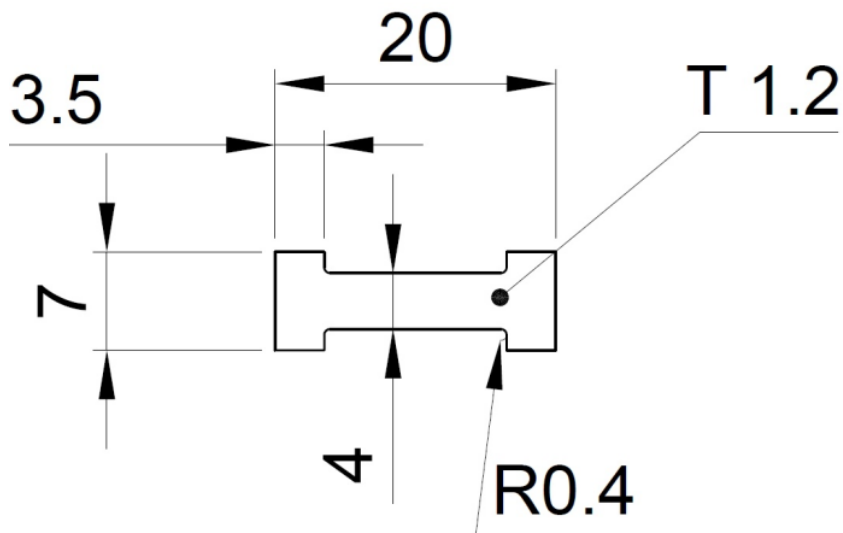
Standardní zkušební vzorky mají rozměr $\varnothing 8\text{mm}$, $l_0=40\text{mm}$, viz **Obr. 128**, a byly vyrobené běžným obráběním, některé vzorky byly opatřeny břitzy pro umístění táhel pro snímače měření okamžité deformace. V laboratoři bylo k dispozici šest měřicích míst pro creepové zkoušky s měřenou deformací, výsledkem většiny zkoušek je doba do lomu.



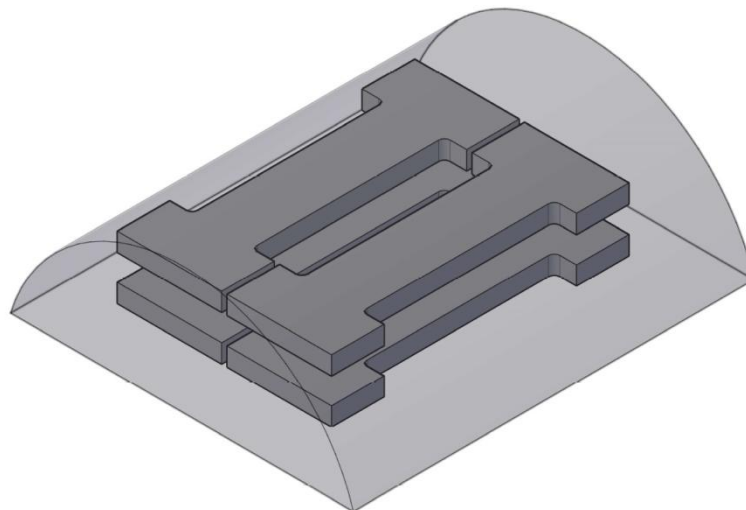
Obr. 128 Standardní zkušební tyč pro zkoušky tečení

Zkušební tělesa SPT pro zkoušky tečení byla zhotovena stejným způsobem jako vzorky SPT pro zkoušky za pokojové teploty, jedná se leštěný disk $\varnothing 8$ mm tloušťky $0,500 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$. Výsledkem zkoušek je graf závislosti deformace na času, pro srovnání je v tabulce výsledků uvedena doba do lomu.

Pro mini vzorky byl navržen tvar tělesa, který vychází z tvaru odebraného vzorku materiálu semi-destruktivním způsobem zařízením EDSE, tak aby bylo možné ze vzorku typu „lodička“ odebrat co nejvíce zkušebních vzorků pro zkoušky tečení **Obr. 130**. Jedná se o plochý vzorek, jehož měřená část má rozměr $4 \times 1,2$ mm **Obr. 129** a dostatečnou délku pro vyhodnocení tažnosti. Výsledkem těchto zkoušek je doba do lomu.



Obr. 129 Geometrie miniaturního zkušebního tělesa pro zkoušky tečení



Obr. 130 Návrh umístění zkušebních tyčí v odebraném vzorku materiálu

Zkoušky tečení na klasických zkušebních tyčích byly provedeny na standardních strojích, viz **Obr. 131**, pro zkoušky tečení těles SPT byly tři běžné stroje speciálně upravené. Použita byla specifická táhla, která mění směr působící síly z tahové na tlakovou. Vzorek se vkládá do přípravku, který je stejný jako přípravek použitý pro SPT test za pokojové teploty, byl však použit žárupevný materiál. Vzorek se umístí do přípravku a ten následně mezi táhla creepového stroje, **Obr. 132**, v průběhu zkoušky tlačí na vzorek keramická kulička vyrobená z materiálu na bázi Al_2O_3 o průměru 2,5mm. Pro zkoušky mini vzorků byl navržen a vyroben upínací přípravek, který se našroubuje na táhla běžného stroje, stroj tak není nutné nijak dále upravovat. Aby byla zajištěna shodná přitlačná síla pro všechny zkoušky, byl přípravek dotahován momentovou silou 25 Nm pomocí momentového klíče.



Obr. 131 Standardní stroje pro zkoušky tečení



Obr. 132 Zařízení, speciálně upravené pro SPT creep testy

11.2. Provedení zkoušek tečení

Po ustavení zkušební vzorku do zkušebního stroje se nastaví třízónová odporová pec výškově tak, aby byl zkušební přípravek umístěn v jejím středu, kde je zajištěna rovnoměrná teplota po celé měřené délce zkušební tyče. Následuje izolace pece izolačním materiálem, keramickou vlnou Kaowool. Na regulátoru pece je nastavena požadovaná teplota pro jednotlivou zkoušku. Průběh teplot v peci je zaznamenáván na bodovém zapisovači Zepakord se záznamem na papír, který je společný pro šest pecí a je umístěn na panelu vedle regulátorů, na **Obr. 133** vlevo. Přímo na zkušební tyč je připevněn kontrolní kalibrovaný termočlánek typu S (Pt-Rh10%), podle kterého je ověřována teplota na zkušebním tělese. Měření deformace bylo provedeno prostřednictvím kapacitního snímače, který měří deformaci s přesností 0,001 mm. Všechna měřící místa v laboratoři jsou svedena do šedesáti kanálové ústředny. Z měřící ústředny (**Obr. 134**) může být prováděn sběr dat do počítače v intervalu od 6 sekund do 24 hodin. Po ustálení teplotního pole je zkouška zatížena přes pákový mechanismus na předem stanovené zatížení pomocí závaží.



Obr. 133 Panel regulátorů pecí



Obr. 134 Měřicí ústředna

Uspořádání jednotlivých zkoušek tečení je znázorněno na Obr. 135 až Obr. 137.



Obr. 135 Uspořádání zkoušky tečení - klasický vzorek



Obr. 136 Uspořádání zkoušky tečení - SPT vzorek



Obr. 137 Uspořádání zkoušky tečení - mini vzorek

Na **Obr. 137** je zobrazeno uspořádání zkoušky tečení s použitím mini vzorku, na **Obr. 138** stav po provedené zkoušce. Navržený přípravek je určen pouze pro získání doby do lomu, neumožňuje měření deformace. Pro měření deformace s využitím stávajícího způsobu je třeba vyrobit upínací přípravek s břity pro umístění táhel.



Obr. 138 Stav po zkoušce tečení mini vzorku

Výsledky jednotlivých zkoušek tečení jsou zpracovány do tabulek rozdělených dle typu zkušebních vzorků a jednotlivých materiálů. Porovnání je provedeno v diagramu závislosti napětí

a Larson – Millerova parametru. Na obrázku **Obr. 139** jsou zobrazeny příklady zkušebních vzorků po provedené zkoušce tečení.



Obr. 139 Zkušební tělesa po provedené zkoušce tečení

11.3. Materiál č. 1 parovod

Pro materiál č. 1 byly odhadem dle míry degradace zadány parametry zkoušení tak, aby při teplotách 550, 575 a 600°C a napětích 30 až 190MPa byly doby do lomu cca 200, 500, 1000, 2000, 5000 a 10 000 hodin. Bylo tedy provedeno 18 klasických zkoušek tečení, nejdelší doba do lomu byla 7 699 hodin. Všechny výsledky jsou uvedeny v tabulkách **Tab. 48** až **Tab. 50**.

Tab. 48 Výsledky zkoušek tečení na klasických zkušebních tyčích

Poř. č.	T (°C)	R(MPa)	DDL(h)	Označení
1	550	190	4	16
2	550	160	46	13
3	550	150	69	10
4	550	130	178	7
5	550	115	830	4
6	550	100	4331	1
7	575	145	15	17
8	575	125	53	14
9	575	110	672	11
10	575	100	729	8
11	575	90	854	5
12	575	80	8104	2
13	600	110	90	18
14	600	100	93	15
15	600	90	516	12
16	600	80	1174	9
17	600	75	1140	6
18	600	60	7699	3

Tab. 49 Výsledky zkoušek tečení na mini vzorcích

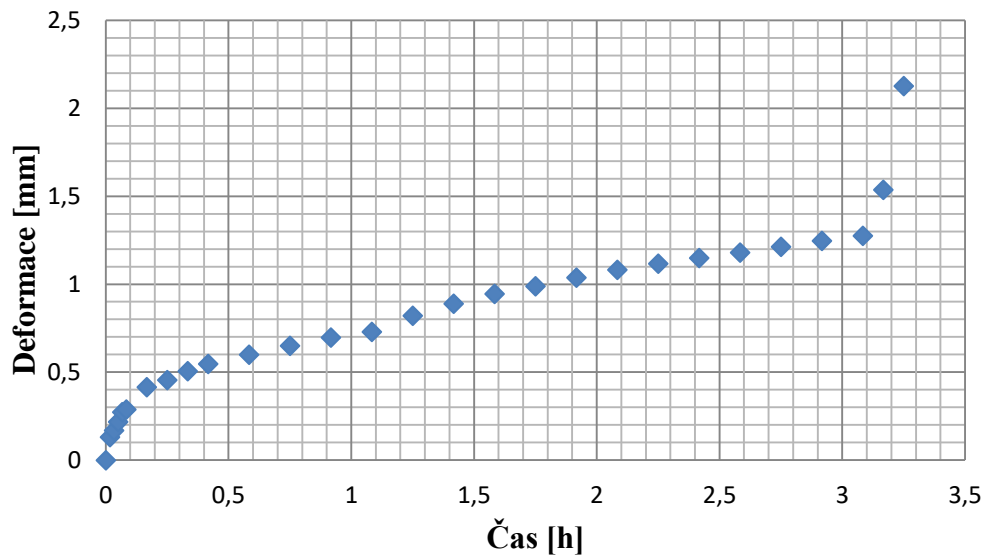
Poř. č.	T (°C)	R(MPa)	DDL(h)	Označení
1	500	190	240	1P
2	575	110	145	2P
3	575	100	689	5P
4	575	150	59	6P
5	550	160	96	4P
6	575	180	18	7P
7	575	160	50	8P
8	525	210	30	9P

Tab. 50 Výsledky zkoušek tečení na SPT vzorcích

Poř. č.	T (°C)	F(N)	DDL(h)	Označení
1	600	540	0,25	SP 1
2	600	490	2,07	SP 2
3	600	440	3,35	SP 3
4	600	390	20,33	SP 4
5	600	370	30	SP 5
6	575	540	1,92	SP 6
7	575	490	3,22	SP 7
8	575	440	3,25	SP 8
9	575	390	50	SP 9
10	550	390	72	SP 10
11	550	295	93	SP 11
12	550	295	96	SP 12
13	550	345	93	SP 13
14	525	340	380	SP 14
15	525	295	400	SP 15
16	525	245	470	SP 16

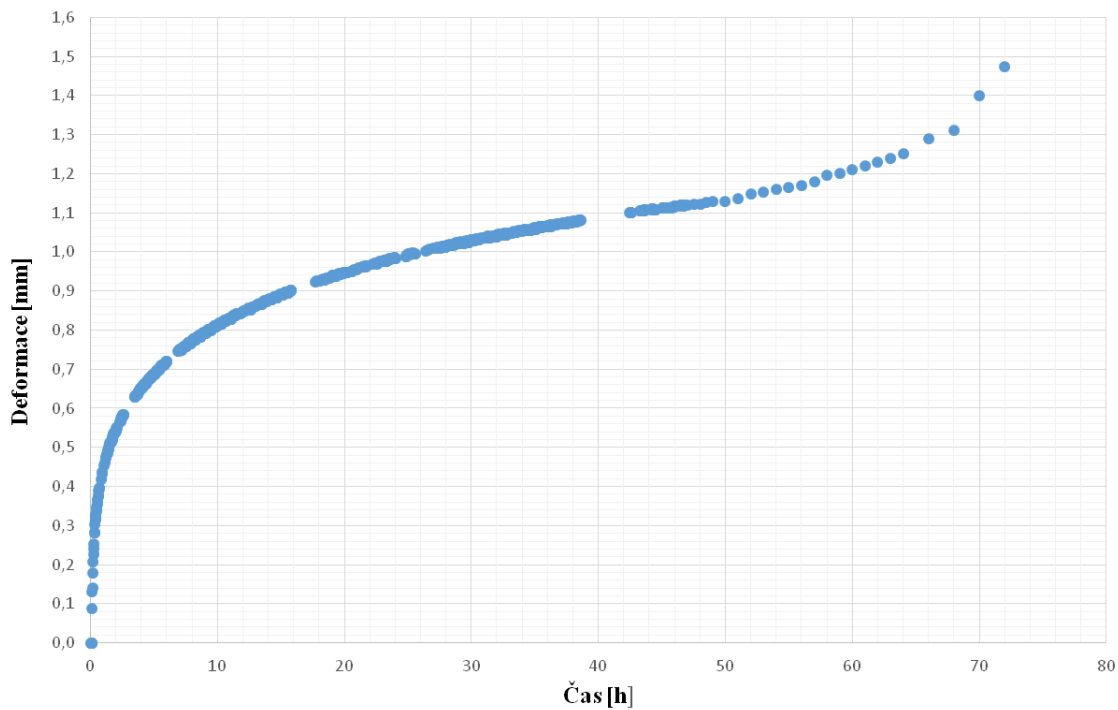
Zkoušky byly provedeny při teplotách 525 až 600°C a silách $F=245 - 545\text{N}$. Měřená závislost měla typický charakter creepové křivky. Příklady záznamů creepových zkoušek SPT jsou uvedeny na obrázcích **Obr. 140**, **Obr. 141**.

SP 8



Obr. 140 Příklad záznamu zkoušky tečení zkušebního SPT vzorku č. SP 8

SP 10



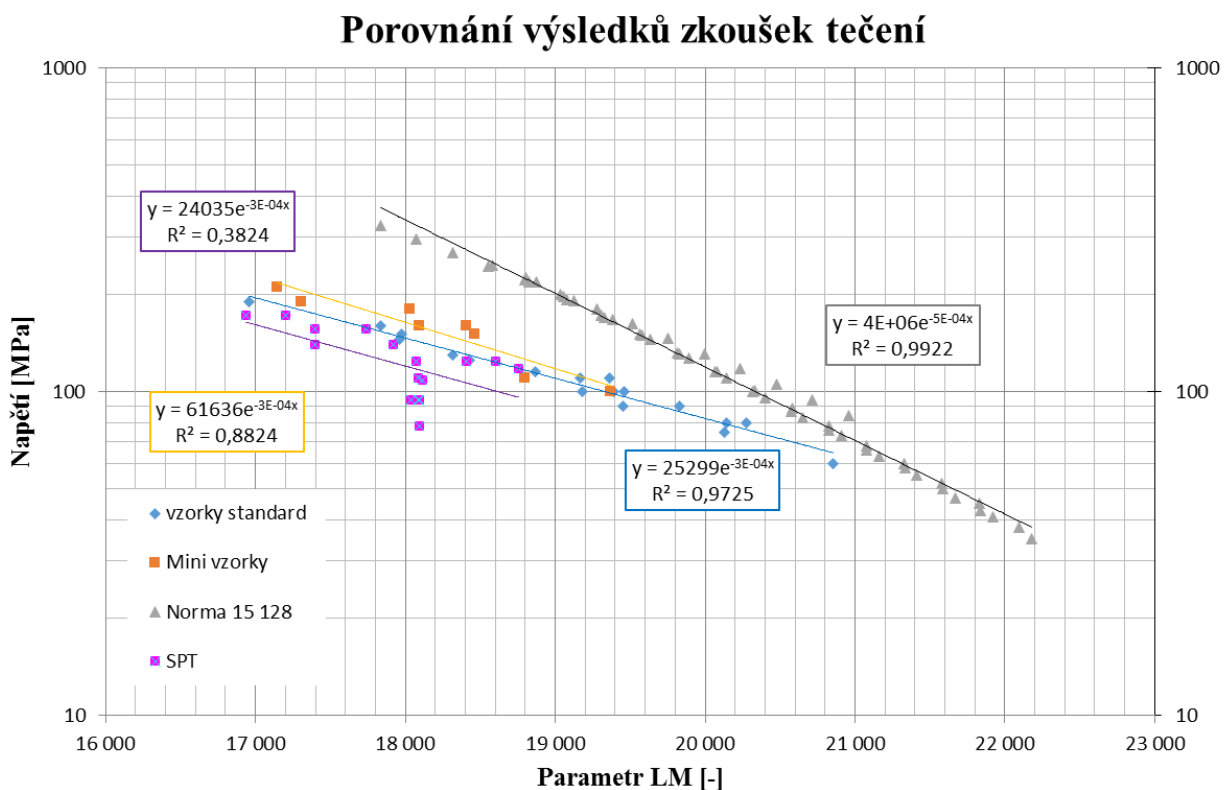
Obr. 141 Příklad záznamu zkoušky tečení zkušebního SPT vzorku č. SP 10

Pro získání napětí u SP creep testu byl použitý následující vztah:

$$\frac{F}{\sigma} = 3.33k_{sp}R^{-0.2}r^{1.2}h_0 \quad (42)$$

Všechny zkoušené vzorky materiálu 1 měly tloušťku $0,500 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$. Předpoklady pro dosažení do (1): $h_0 = 0,5 \text{ mm}$, $r = 1,25 \text{ mm}$, $R = 2,2 \text{ mm}$, $k_{sp} = 1$.

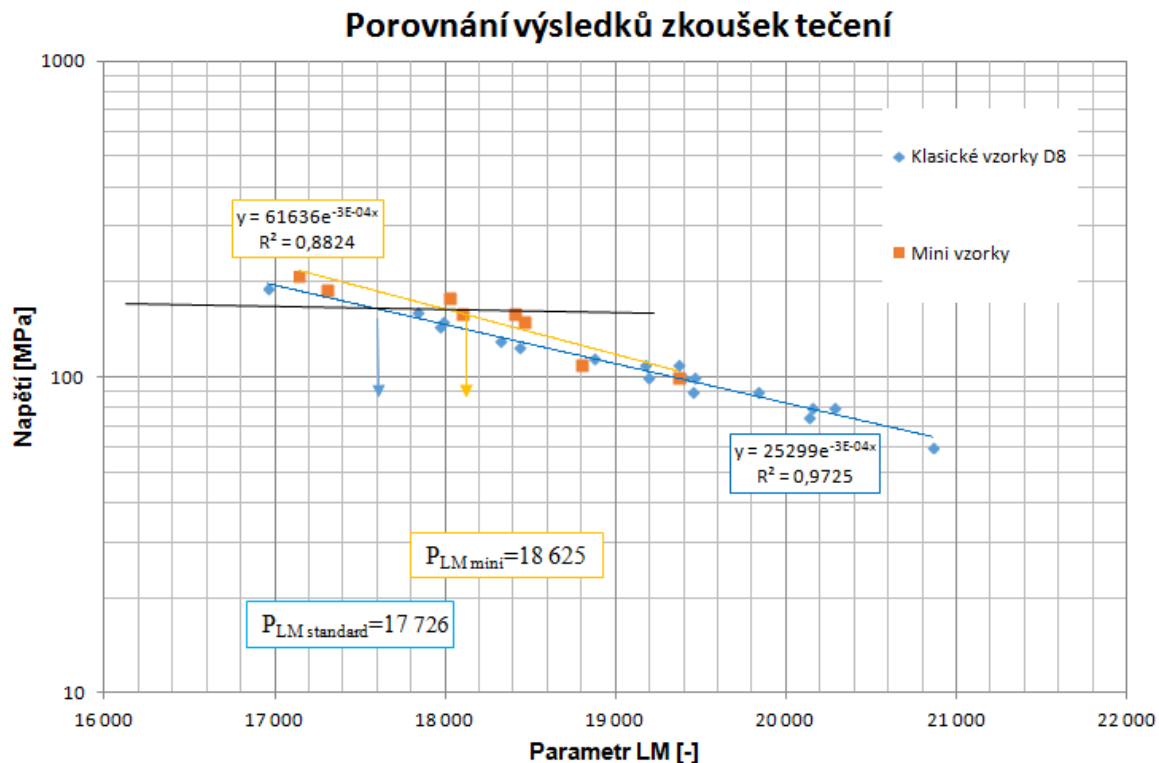
Výsledky všech zkoušek získané pro materiál č. 1 byly zaznamenány do Larson – Millerova diagramu a porovnány s výsledky tradičních jednoosých testů této ocele dle normy [68] Viz **Obr. 142**.



Obr. 142 Porovnání výsledků jednotlivých zkoušek pro materiál č. 1 15 128 po provozu

Korelační parametr pro vzorky SPT byl stanoven z diagramu závislosti Parametr LM na napětí a byl určen na 1,7.

Pro materiál parovodu byl proveden výpočet zbytkové životnosti za použití výsledků klasických zkoušek tečení a výsledků zkoušek tečení z mini zkušebních těles. Viz **Obr. 143**.



Obr. 143 Výsledky klasických zkoušek a mini vzorků pro určení LM parametru

Pro výpočet bylo použito těchto parametrů:

rozměr parovodu TR KR 324 - 48 mm, provozní teplota 543 °C, provozní tlak 18MPa, parametr LM $P_{LM} = T (20 + \log \tau)$ byl odečten z grafu Obr. 143, a to z výsledků zkoušek tečení jak na klasických zkušebních tělesech, tak na mini tělesech.

Výpočtem byla zjištěna zbytková životnost 661 resp. 879 hod.

$$\tau_Z = 10^{\left(\frac{P}{T} - 20\right)} = 10^{\left(\frac{18625}{543 + 273,16} - 20\right)} = 661[h] \quad \text{mini vzorky}$$

$$\tau_Z = 10^{\left(\frac{P}{T} - 20\right)} = 10^{\left(\frac{17726}{543 + 273,16} - 20\right)} = 879[h] \quad \text{standardní vzorky}$$

Výsledky z obou použitých metod vykazují v rámci rozptylu poměrně dobrou shodu. Oba tyto výsledky odpovídají době provozu komponenty. – parovodu, který již byl vyřazen z provozu.

Při použití mini vzorků lze po jejich přetržení vypočítat tažnost. Výsledky tažnosti při stejných parametrech zkoušky jsou uvedeny v tabulce **Tab. 51**.

Tab. 51 Porovnání hodnot tažnosti A[%] klasických vzorků a mini vzorků.

Parametry zkoušky		Klasika	Mini vzorek
[°C]	[MPa]	A[%]	A[%]
500	190	44,3	39,2
575	110	34,3	28,2
575	100	29,8	21,9
575	150	42,5	40,5
550	160	42,3	36,3
575	180	44,3	36,0
575	160	42,5	37,8

11.4. Materiál č. 2 vnitřní těleso skříně

Pro materiál č. 2 byly určeny parametry odhadem dle výsledků zkoušek tečení z normy ŠN 42 2747 a s ohledem na pracovní teplotu 530°C. Zkušební teplota byla určena 530, 550 a 600°C a napětí odhadnuté na 100 až 200MPa, tak aby nejdelší doba do lomu byla přibližně 10 000hodin. Bylo tedy založeno 15 zkoušek a v současné době bylo ukončeno lomem sedm klasických zkoušek tečení, ostatní zkoušky stále probíhají. Stejně parametry byly pro porovnání výsledků zvoleny i pro mini vzorky a SPT vzorky. Výsledky jednotlivých zkoušek jsou uvedené v **Tab. 52** až **Tab. 54**.

Tab. 52 Výsledky zkoušek tečení na klasických zkušebních tyčích

Poř. č.	T (°C)	R(MPa)	DDL(h)	Označení
1	530	200	123	1B1_1
2	600	100	2113	2A_1
3	530	190	102	1B1_1D
4	530	170	437	1B1_2D

5	550	180	110	1B1_2
6	550	160	158	1B1_3
7	550	120	2600	1B1_3D

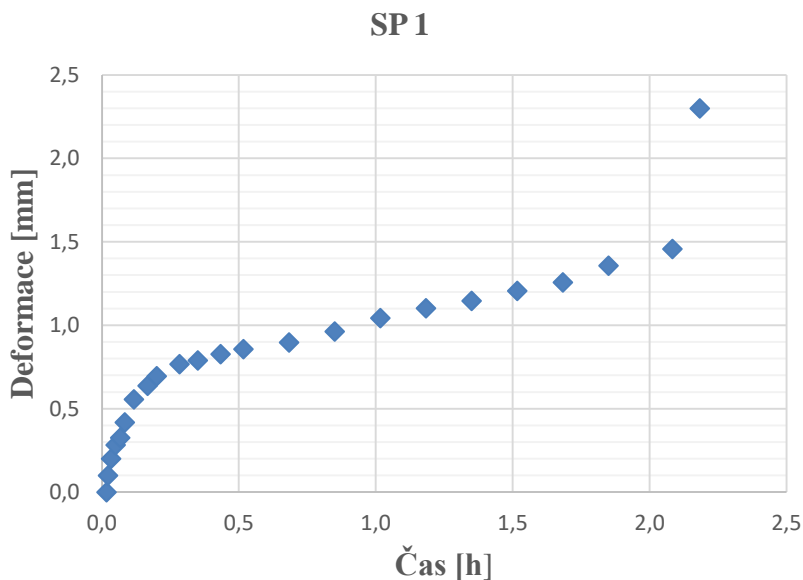
Tab. 53 Výsledky zkoušek tečení na mini vzorcích

Poř. č.	T (°C)	R(MPa)	DDL(h)	Označení
1	550	200	6	1S
2	550	200	18	2S
3	550	190	42	3S
4	550	190	56	4S
5	575	180	18	5S
6	530	170	560	6S
7	530	180	256	7S
8	510	190	950	8S

Tab. 54 Výsledky zkoušek tečení na SP vzorcích

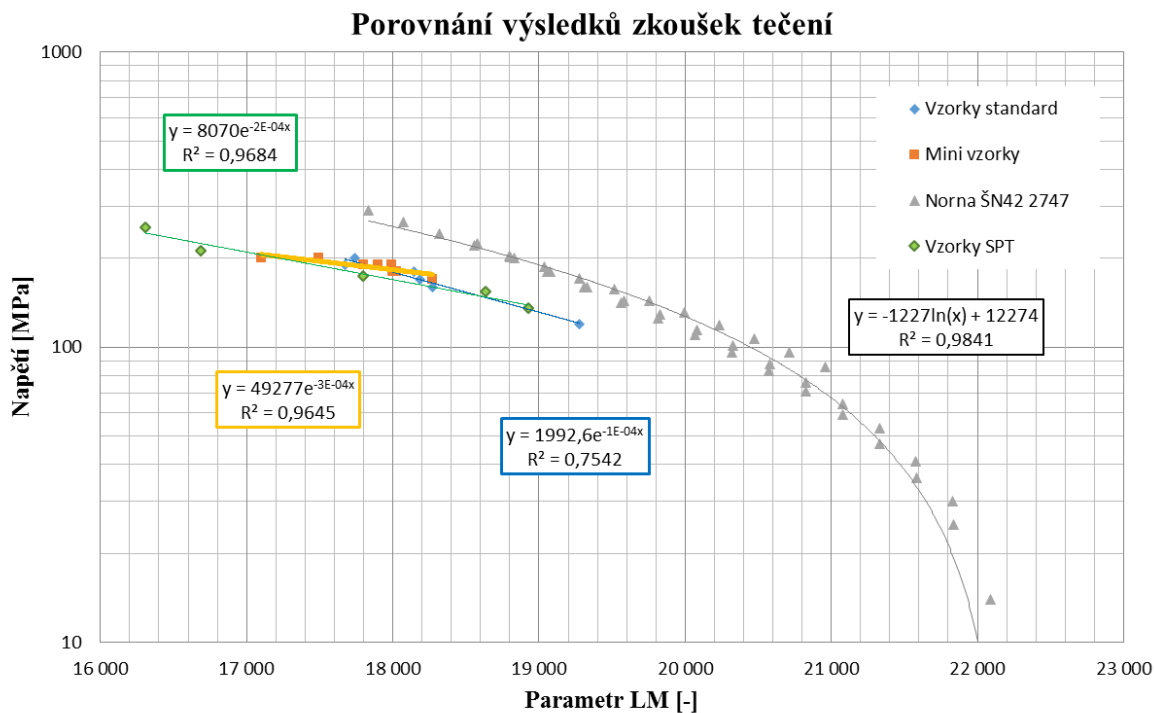
Poř. č.	T (°C)	F(N)	DDL(h)	Označení
1	530	660	2	SP 1
2	530	550	6	SP 2
3	530	450	145	SP 3
4	550	400	437	SP 4
5	550	350	980	SP 5

Zkoušky SPT byly provedeny při teplotách 530 až 550°C a silách F=350 - 660N. Měřená závislost měla typický charakter creepové křivky. Příklad záznamu je uveden na **Obr. 144**.



Obr. 144 Příklad záznamu zkoušky tečení zkušebního SPT vzorku č. SP1

Výsledky všech zkoušek získané pro materiál č. 2 byly zaznamenány do Larson – Millerova diagramu a porovnány s výsledky tradičních jednoosých testů této ocele dle normy [68] jsou uvedeny na **Obr. 145**. Korelační parametr pro vzorky SPT byl stanoven z diagramu závislosti Parametr LM na napětí a byl určen na 1,4.



Obr. 145 Porovnání výsledků jednotlivých zkoušek pro materiál ŠN 42 2747 po provozu

11.5. Materiál č. 3 svarový spoj

Pro materiál č. 3 byly stanoveny parametry zkoušení dle materiálové listu – normy základního materiálu 16 236 tak, aby při teplotách 475, 500, 525, 550 a 600°C, při napětích 120 až 240MPa byly doby do lomu cca 1000, 2000, 5000, 10 000 a jeden vzorek až 30 000 hodin. Jedná se o svarový spoj s návarem, vzorky tedy byly vyrobeny z oblasti přechodu základního materiálu 12ks, kdy svar je umístěn do středu zkušební tyče a z oblasti návaru. Pro obě oblasti byly vždy shodné parametry. Bylo založeno 24 klasických zkoušek tečení, V současné době bylo 8 vzorků ukončeno lomem. Nejdélší do lomu byla 2 112 hodin. Všechny výsledky jsou uvedeny v tabulkách **Tab. 55** až **Tab. 57**.

Tab. 55 Výsledky zkoušek tečení na klasických vzorcích

Poř. č.	T (°C)	R(MPa)	DDL(h)	Označení
1	600	120	1100	9_svar
2	550	220	674	1_svar
3	550	200	750	3_svar
4	525	200	1283	2_svar
5	600	100	2113	16_svarr
6	550	220	622	24_svar
7	550	200	982	19_svar
8	525	200	1598	18_svar

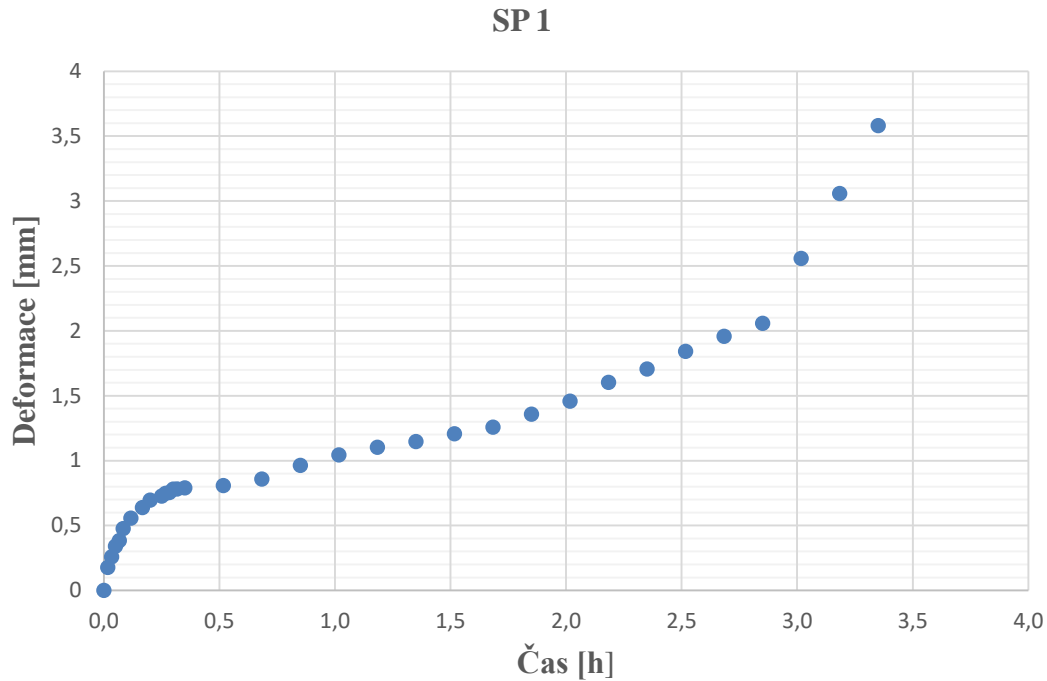
Tab. 56 Výsledky zkoušek tečení na mini vzorcích

Poř. č.	T (°C)	R(MPa)	DDL(h)	Označení
1	600	200	6	M_1
2	550	200	18	M_2
3	550	190	42	M_3
4	525	190	56	M_4

Tab. 57 Výsledky zkoušek tečení na SPT vzorcích

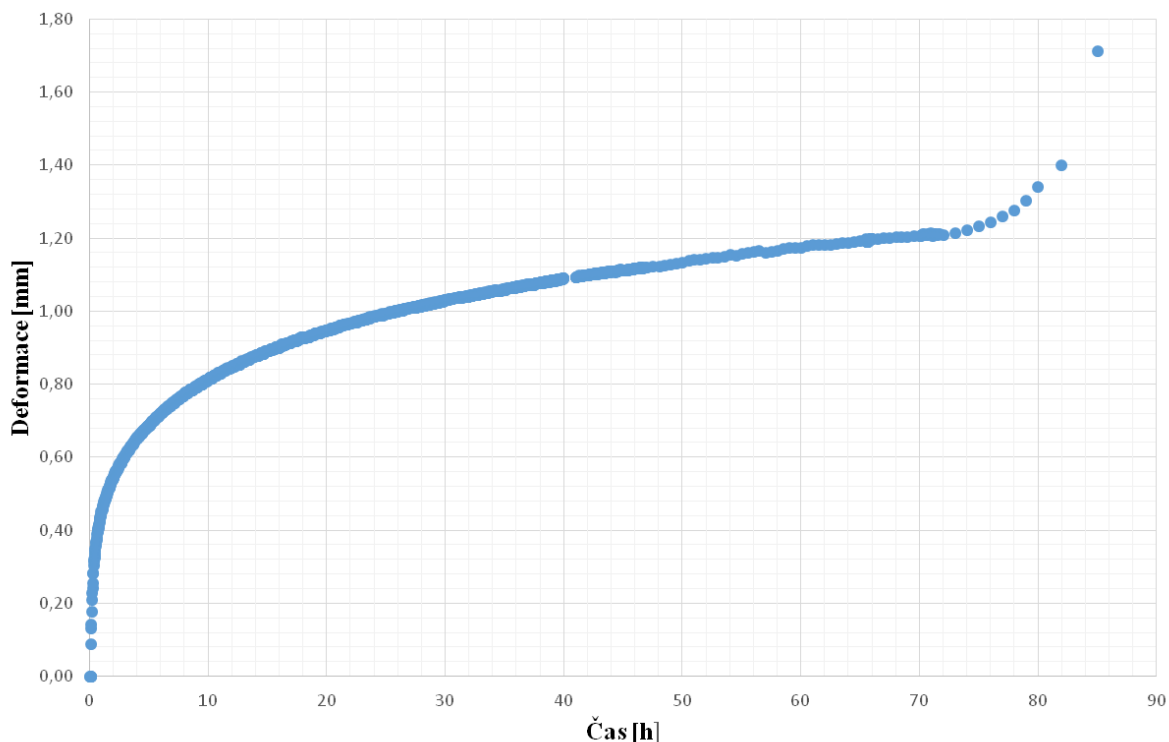
Poř. č.	T (°C)	Síla (N)	DDL(h)	Označení
1	600	490	3,75	SP_1
2	550	540	32	SP_2
3	550	440	86	SP_3
4	525	440	187	SP_4

Zkoušky byly provedeny při teplotách 525 až 600°C a silách $F= 440 - 540\text{N}$. Měřená závislost měla typický charakter creepové křivky. Příklady jednotlivých záznamů jsou uvedeny na **Obr. 146**, **Obr. 147**.



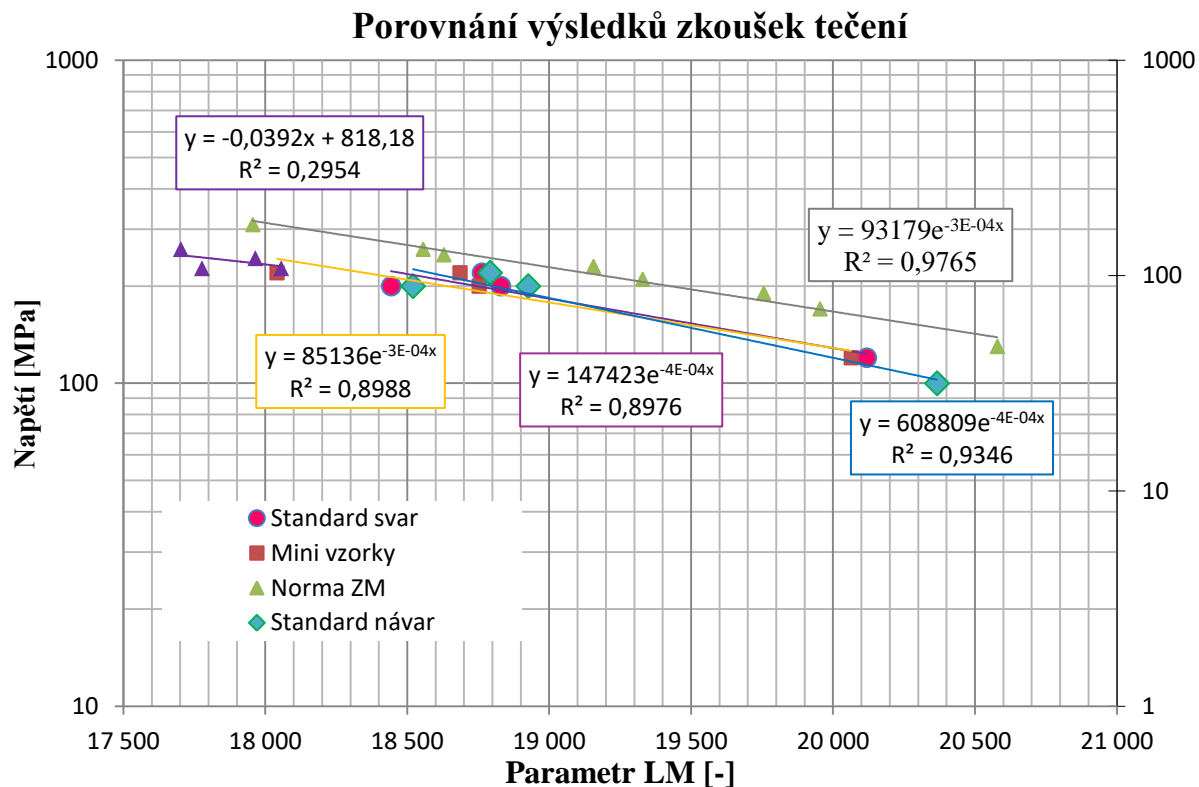
Obr. 146 Příklad záznamu zkoušky tečení zkušebního SPT vzorku č. SP 1

SP 3



Obr. 147 Příklad záznamu zkoušky tečení zkušebního SPT vzorku č. SP 3

Výsledky všech zkoušek získané pro materiál č. 3 byly zaznamenány do Larson – Millerova diagramu a porovnány s výsledky tradičních jednoosých testů základního materiálu ocele dle normy [68] viz **Obr. 148**. Tyto zkoušky jsou unikátní v tom, že creepové charakteristiky materiálu návaru nejsou nikde v literatuře uvedeny. Na následujícím diagramu je dobře patrné jak proces svařování ovlivnil creepové chování základního materiálu. Materiál návaru byl velmi dobře zvolen, protože z dosavadní výsledky dobře zapadají mezi výsledky z přechodové oblasti. Parametry zkoušení jsou nastaveny tak, že zkoušky budou probíhat po dobu cca 4 let. Zkoušení je na počátku, nicméně se potvrdilo, že výsledky zkoušek tečení mini vzorků také dobře korespondují s výsledky zkoušek na klasických tělesech.



Obr. 148 Porovnání výsledků jednotlivých zkoušek pro materiál č. 3, svarový spoj

Korelační parametr pro vzorky SPT byl stanoven z diagramu závislosti Parametr LM na napětí a byl určen na 2,2.

11.6. Diskuze výsledků zkoušek tečení

Byly provedeny zkoušky na standardních zkušebních tělesech pro tři různé materiály. Byly provedeny zkoušky SPT a bylo navrženo zcela nový tvar tělesa - mini vzorek, který lze vyrobit ze vzorku typu lodičky (boat sample) získaný semi-destruktivním odběrem metodou EDSE. Pro tyto zkoušky byly navrženy a odzkoušeny přípravky pro upnutí do stávajících táhel strojů. Miniaturní creepový zkušební vzorek umožňuje použití stejného módu zatěžování jako u standardních zkoušek, což je podstatná výhoda oproti použití vzorku SPT. Výsledky zkoušek získané pomocí jednotlivých metod jsou přehledně srovnány pomocí Larson – Millerova parametru, jenž umožňuje vynést všechny výsledky zkoušek do jedné řídicí křivky a porovnat je mezi sebou. Provedené zkoušky tečení na vzorcích typu Small Punch i na mini vzorcích potvrdily možnost využívat tento typ miniaturních zkušebních vzorků jako prostředek pro hodnocení mechanických vlastností konstrukčních součástí v případech, kdy z provozovaných součástí nelze z jakýchkoliv důvodů odebrat dostatečné množství reprezentativních vzorků pro výrobu standardních zkušebních těles.

Pro sledované materiály byl stanoven korelační koeficient pro degradovaný materiál parovodu na hodnotu 1,7, pro degradovaný litý materiál skříně na hodnotu 1,4 a pro negradovaný materiál svarového spoje na hodnotu 2,2. Z těchto výsledků je zřejmé, že v případě použití SPT creep testů je vždy nutné určit korelační vztah jednotlivě pro každý zkoumaný materiál, který je provozován při creepových teplotách a nelze jej aplikovat univerzálně. Pro použití je nutné vytvořit databázi korelačních vztahů pro nejpoužívanější materiály ve sledované oblasti např. energetice a to nejen pro původní stav materiálu, ale také pro stav po provozu - degradovaný, aby bylo možné určit, zda je možné používat pro daný materiál jeden korelační vztah stejný po celou dobu degradace materiálu

Použití mini creepových vzorků bylo pro výrobu, provedení zkoušky a vyhodnocení výsledků výrazně jednodušší než SPT. Hlavní výhodou těchto zkoušek je stejné zatížení zkušebního vzorku jako u klasických vzorků, kdy výsledky ukazují, že není nutné přepočítávání hodnoty zatěžující síly. Z grafu závislosti Larson – Millerova parametru na napětí bylo jasně vidět, že výsledky zkoušek tečení na mini vzorcích dobře korespondují s výsledky standardních zkoušek. Z výsledků zkoušek tečení na materiálu parovodu získaných jak za použití standardních zkušebních těles, tak i při použití mini zkušebních těles, bylo provedeno hodnocení zbytkové životnosti. Výsledek byl uspokojivý v rámci rozptylu zkoušek tečení, hodnota 879 hod pro standard a 661hod pro mini vzorky.

V porovnání výsledků zkoušek tečení na klasických vzorcích a mini vzorcích, je třeba pokračovat, ověřit platnost na dalších materiálech při různých stupních degradace, případně provést mezilaboratorní porovnávací zkoušky. Dále bude nutné provést testování zejména pro delší doby do lomu, tak jak to vyžaduje norma pro zkoušky tečení, pak bude nutností provádět tyto dlouhodobé zkoušky v ochranné atmosféře, stejně jako zkoušky SPT.

I přes relativně malý počet zkušebních vzorků byla ověřena možnost použití malých zkušebních těles pro zkoušky tečení a lze na základě výsledků zkoušek uvedených v této práci stanovit zbytkovou životnost.

12. Diskuze výsledků

Experimentální část byla zaměřena na praktické využití metod pro stanovení materiálových charakteristik s využitím miniaturních vzorků. Proto byla práce zaměřena na materiály, které se běžně používají v energetice, některé byly zkoumány ve stavu po degradaci.

Pro porovnání výsledků zkoušky tahem bylo provedeno 10 standardních zkoušek a 30 zkoušek Small Punch Test při +20 °C. Dále byla ověřena metodika zkoušení pomocí mikro tahového tělesa pro 32 zkušebních těles. Při použití tohoto typu vzorku lze určit všechny charakteristiky vyhodnocované ze standardních zkoušek tahem (R_m , $R_{p0,2}$, A , Z), vzhledem k faktu, že zatěžování v průběhu zkoušky je identické jako u standardní zkoušky a při použití optického měření deformace v průběhu testu (např. systém digitální obrazové korelace ARAMIS) je získaný záznam srovnatelný se záznamy ze zkoušek tahem na standardních tělesech. Tento způsob měření se ukázal jako vhodný pro měření lokálních vlastností z různých (kritických) míst provozovaných součástí díky výbornému souhlasu mezi výsledky naměřenými na standardních a miniaturních vzorcích. Navíc i výroba zkušebních těles je méně náročná. Mezilaboratorní zkoušky vykazovaly dobrý souhlas mezi výsledky.

Po vyhodnocení výsledků jednotlivých metod lze konstatovat, že v případě materiálu parovodu byla shoda výsledků velmi dobrá, rozdíl mezi hodnotou meze pevnosti a kluzu ve srovnání s výsledky standardním vzorků a stanovenou mikro vzorkem 4 a 4,5% (21 a 16MPa) a -6% resp. +7% (-31 a +25MPa) u SPT. Dobrá shoda výsledků u SPT vzorků je daná použitým korelačním vztahem, který není obecný, ale je určen z konkrétních výsledků standardní tahové zkoušky pro daný materiál.

V případě druhého materiálu, v oblasti návaru byly pro porovnání provedeny zkoušky M-TT ve dvou laboratořích. Výsledky dosáhly rozptylu oproti výsledkům standardních zkoušek 1,3 a 1,5% (+10 a +11MPa) u meze pevnosti a -3,8 a -3% (-25 a -20MPa) u meze kluzu. Stanovení tahových charakteristik pomocí M-TT představuje stejný mód zatěžování jako klasické zkoušky tahem, navíc lze stanovit i hodnoty tažnosti a kontrakce, které u použití metody SPT nelze vyhodnotit. Provedené porovnání bylo i přes malý počet vzorků velmi příznivé pro miniaturní tahové vzorky. V případě korelačních vztahů ze Small Punch Testů tyto nelze brát jako materiálové konstanty, jejich použití u každého typově nového materiálu je třeba ověřit. Nevýhoda SPT je nutnost přepočtu naměřených hodnot na standardní charakteristiky pomocí empirických korelací, což obnáší nezbytnost vytvoření databáze pro zkoumané typy materiálů. Výsledky ze zkoušek za použití mikro tahových vzorků nemusí na rozdíl od zkoušek Small Punch Test být nijak korelovány a mají pravděpodobně univerzální platnost pro všechny konstrukční materiály. Mikro tahové vzorky lze např. použít pro určení anizotropie tenkostěnných trubek nebo pro měření lokálních vlastností z různých (kritických) míst provozovaných součástí. Dosažené výsledky potvrzují vysoký aplikační potenciál miniaturních zkoušek tahem vzhledem k možnému přímému vyhodnocení vlastností bez použití jakýchkoliv korelací, minimálnímu objemu nezbytného experimentálního materiálu a plně srovnatelných výsledkům se standardními zkušebními tělesy.

V oblasti posouzení odolnosti materiálu vůči křehkému porušení bylo zkoumáno vyhodnocení přechodové teploty pomocí zkoušky rázem v ohybu. Pro určení přechodové teploty $FATT_{50}$ v případě nedostatku experimentálního materiálu, nebo u vzorku materiálu odebraného semi destruktivním odběrem, byla ověřena metodika použití těles mini Charpy těles. Bylo zkoumáno, zda výsledný teplotní posun mezi $FATT$ pro jednotlivé uvažované geometrie Charpy vzorků bude

konstantní pro různé materiály, jak naznačují literární zdroje. Pro potvrzení tohoto tvrzení byly vybrány čtyři odlišné materiály: degradovaný materiál parovodu, degradovaný litý materiál, nedegradovaný svarový spoj v oblasti tepelně ovlivněné oblasti a v oblasti návaru. Měření přechodové teploty lze také určit pomocí metodiky SPT. Stanoví se koeficient α_{SPT} , ovšem tento koeficient je materiálově závislý a jeho použitelnost se musí pro každý materiál znovu verifikovat, např. [4]. Pracnost této metody pro určení α_{SPT} je velmi velká a naměřit dostatečné množství dat by bylo velmi finančně i časově náročné, proto tato metoda nebyla v práci pro tyto zkoušky aplikována. Pro získání dostatečného počtu výsledků bylo vyhodnoceno 164 zkoušek rázem v ohybu pro určení přechodové teploty $FATT_{50}$, 72 pro standardní tělesa, 72 pro mini Charpy tělesa. Ze získaných výsledků je zřejmé, že vzorky mini Charpy jsou vhodnější než SPT disky, protože výsledky na mini-Charpy tělesech použitých pro vyhodnocení $FATT_{50}$ u všech čtyř materiálů vykazovaly téměř konstantní teplotní posun Δt , který činil 62°C. Větší rozptyl hodnoty teplotního posunu Δt u čtvrtého materiálu lze vysvětlit tím, že oblast návaru byla specifická, každých několik vrstev návaru bylo opakovaně tepelně zpracovááno a každé místo mělo trochu jiné mechanické vlastnosti, což se dodatečně potvrdilo i zkouškou tahem v různých místech návaru. I přes tato specifika, byly nalezené hodnoty teplotních posuvů mezi FATT pro standardní a miniaturní vzorky ve velmi dobrém souladu s publikovanými výsledky a interními zkušenostmi. Výsledky dosažené v rámci této práce potvrzují předpoklad konstantního teplotního posunu mezi přechodovými teplotami a umožňují výrazně přesnější vyhodnocení než SPT, díky zachování srovnatelné citlivosti při vyhodnocování pomocí miniaturizovaných Charpy vzorků, než pro SPT. V případě SPT se jeví na základě publikovaných výsledků jako dominantní faktor ovlivňující přechodovou teplotu geometrie zkušebního tělesa, kdy různé materiály mají velmi podobné hodnoty přechodové teploty vyhodnocené pomocí SPT.

Další oblastí zkoumání miniaturních vzorků byly zkoušky vysokocyklové únavy. V oblasti zkoušek únavy bylo cílem ověření korelačních vztahů při použití již známého tvaru tělesa – typ motýlek na vybraných materiálech a návrh nových zkušebních těles, které vycházejí z odlišného tvaru vzorku po semi destruktivním odběru materiálu metodou EDSE. V experimentální části byly vybrány 2 materiály, které se používají v energetice a u kterých je důležitým parametrem mez únavy. Materiál T552 je ocel určená pro výrobu výkovek pro oběžné lopatky parních turbín a materiál 15Ch2NMFA je používán pro tlakové nádoby reaktorů typu VVER. Pro porovnání výsledků zkoušky únavy na vybraných materiálech bylo provedeno 30ks zkoušek na standardních zkušebních tyčích, 35ks zkoušek na mini vzorcích SFT typu motýlek a 59ks zkoušek na nově navržených plochých zkušebních tělesech označených R10 a R15, dle vybrání ve střední části vzorku, a dále 8 zkoušek na kruhovém tělese o průměru 1,5mm v aktivní části. Před započítáním zkoušek byla u nově navržených plochých zkušebních vzorků provedena počítačová simulace metodou konečných prvků pro určení koncentrátoru napětí v kritickém průřezu. Byly stanoveny teoretické korelační koeficienty pro jednotlivé typy vzorků. Zkoušky byly následně provedeny při zatěžování řízenou silou a pro asymetrii cyklu $R=-1$ a $R=0,1$. Výsledkem mělo být potvrzení korelačního vztahu pro již dříve používaný zkušební vzorek SFT s doplněním výsledků do databáze materiálů úspěšně vyzkoušených pomocí malých vzorků a verifikace výsledků pro nově navržená tělesa. Výsledky experimentálních zkoušek nepotvrdily výpočtové korelace. Experimentálně stanovené korelační vztahy vykazovaly výrazně odlišné hodnoty od teoretických koeficientů stanovených na základě MKP. Navíc byly výsledné korelační vztahy různé pro každý ze sledovaných materiálů. Nebyl potvrzen ani korelační vztah pro SFT, který se v minulosti již používal např. pro ocel P92 [80]. Experimentálně stanovené korelační koeficienty byly 2,3 pro vzorky typu motýlek vyřezané drátovou řezačkou, 1,77 pro výrobu vodním paprskem (oproti výpočtu koncentrace napětí 1,33), 1,8 (oproti výpočtu koncentrace napětí 1,1) pro vzorky R10 a

1,9 (oproti výpočtu koncentrace napětí 1,07) pro vzorky R15. Z literatury, např. [22], i z technické praxe je známý velký vliv stavu povrchu zkušebního tělesa na stanovení meze únavy a při výrobě miniaturních zkušebních těles to platí dvojnásobně. Je potřeba zajistit výrobu tvaru těla zkušebního tělesa s co nejmenším ovlivněním materiálu např. několika průchody drátové rezačky zajistit závěrečné broušení popř. leštění. U nově navržených tvarů plochých vzorků byl proveden experiment s doleštěním hran vzorku před založením zkoušky, ale pravděpodobně byla tato plocha již natolik ovlivněna výrobou, že ani finální leštění nemohlo povrch zlepšit. Na základě neuspokojivých výsledků s plochými miniaturními tělesy, kdy nebyl získán jednotný trend mezi výsledky získanými pomocí miniaturních plochých vzorků a standardních válcových vzorků, byla navržena válcová geometrie miniaturního zkušebního vzorku. Bylo navrženo nové kruhové zkušební těleso s aktivní částí o průměru 1,5mm. Tento tvar se do budoucna jeví jako nejvhodnější z hlediska výroby, zejména finálního opracování. Zkušební tyč lze vyrobit ze vzorku odebraného semi destruktivním odběrem metodou EDSE. Pro ověření vlivu velikostního faktoru na výsledky meze únavy tohoto nového vzorku byly vyrobeny z materiálu 16 343 sady zkušebních těles o průměrech 1,5, 4, 8 a 12mm a byly provedeny zkoušky únavy. Zkoušky stále pokračují, přesto je možné z grafu výsledků zkoušek únavy sledovat podobný charakter směrnice výsledků a bylo možné stanovit časovanou mez únavy pro jednotlivé použité zkušební vzorky. Nově navržené válcové miniaturní s průměrem 1,5mm zjednodušují upínání kruhových zkušebních tyčí. Byla zajištěna sousost, všechny lomy vznikly ve středové části zkušební tyče a všechny výsledky byly platné. Výsledky získané na vzorcích různých průměrů vykazují velmi blízké hodnoty meze únavy. Je nutné stávající výsledky výrazně rozšířit pro získání všeobecného přehledu o aplikovatelnosti metody. Nicméně stávající výsledky potvrzují možnost získání spolehlivých výsledků na základě miniaturních vzorků bez nezbytnosti korelace výsledků.

Pro porovnání výsledků v oblasti zkoušek tečení byly provedeny zkoušky tečení na 33 standardních tělesech, byla provedena verifikace metody Small Punch Creep Test na 25 zkušebních vzorcích a byla vyvinuta a ověřena nová metodika zkoušek u 20 nově navržených zkušebních mini vzorků. Tvar tohoto tělesa byl inspirován tvarem vzorku odebraného semi destruktivním odběrem metodou EDSE – vzorek typu lodička. Zkoušky tečení byly provedeny na třech materiálech, které se běžně používají v energetice, první dva materiály byly zkoumány ve stavu po provozu. Výsledky testů SPT zejména u prvního materiálu vykazovaly velký rozptyl. Výsledky jsou zapisovány do výsledného grafu po přepočtu zatěžující síly na napětí a pak jsou hodnoty korelovány s výsledky standardních zkoušek, v případě velkého rozptylu hodnot je určení korelace obtížné. Naopak výsledky ze zkoušek mini těles přinesly velmi dobré výsledky, při celkovém porovnání velmi dobře korespondovaly s výsledky standardních testů, bez použití jakéhokoli korelačního vztahu. Zatěžování u nově navrženého mini vzorku bylo stejné jako u standardních těles, díky čemuž bylo možné výsledky přímo porovnat s výsledky vzorků standardní velikosti. V případě materiálu parovodu byl proveden i výpočet zbytkové životnosti jak z výsledků standardních těles, tak i z výsledků mini těles a výsledek byl velmi uspokojivý v rámci rozptylu zkoušek tečení, hodnota 879 hod pro standard a 661hod pro mini vzorky. Výsledky zkoušek tečení jsou jedinečné v tom, že creepové charakteristiky materiálů po provozu jsou velmi ceněny hlavně pro určování míry degradace materiálu a creepová charakteristika svarových spojů je důležitá pro porovnání ovlivnění základního materiálu při procesu svařování. Nově navržené těleso je zcela původní, výsledky zkoušek tečení nejsou nikde v literatuře uvedeny. V případě mini vzorků byla zároveň verifikována metoda použití výsledků zkoušek tečení mini vzorků pro výpočet zbytkové životnosti.

Práce se soustředila na praktické využití výsledků zkoušek mechanických vlastností za použití miniaturních vzorků. Degradované materiály představovaly oblast materiálů, na kterých je reálné provést odběr semi destruktivním způsobem pro odhad zbytkové životnosti, svarový spoj představoval oblast použití malých vzorků pro určení lokálních materiálových vlastností - oblast TOO a oblast návaru. Na základě rozboru dosažených výsledků lze konstatovat, že použití SPT testů v oblasti zkoušek tečení je možné, výsledky testů SPT je však třeba vždy korelovat atomu také odpovídá spolehlivost naměřených výsledků. Použití miniaturizovaných standardních vzorků přineslo velmi dobré výsledky ve srovnání s výsledky zkoušek standardní velikosti vzorků a ukázalo další směry vývoje v této oblasti popisu materiálového chování.

13. Závěr

Hlavním cílem této disertační práce bylo porovnání výsledků zkoušek mechanických vlastností získaných pomocí standardizovaných zkušebních těles a miniaturizovaných těles u vybraných zkoušek (zkouška tahem, zkouška rázem v ohybu, zkouška únavy a zkouška tečení). V teoretické části byly popsány jednotlivé vybrané standardní zkoušky mechanických vlastností a používané zkoušky miniaturních těles, např. Small Punch Test. Byl popsán semi destruktivní odběr materiálu a možnosti, z takto odebraného vzorku vyrobít dostatečný počet zkušebních těles pro stanovení materiálových charakteristik provozovaných komponent. Pozornost byla věnována podrobným zkušebním tělesům, které však mají stejný způsob zatěžování jako standardní zkušební vzorky. Například při použití těchto moderních metod hodnocení stavu materiálu v programu běžných kontrol mohou významně přispět k přesnějším výsledkům míry degradace materiálů a tím i k ekonomickým úsporám.

Práce se zabývala ověřením/vývojem metodik využívajících miniaturních zkušebních vzorků pro zkoušky tahem, zkoušky rázem v ohybu, zkoušky únavy a zkoušky tečení. U těchto zkoušek byly vyhodnocovány tyto typické materiálové charakteristiky: R_m , $R_{p0,2}$, A , Z , KV , KCV , $FATT_{50}$, R_{mb} , σ_c . Na 5 materiálech bylo celkem provedeno více než 600 zkoušek (51 zkoušek tahem, 40 zkoušek Small Punch Test při +20 °C, 164 zkoušek rázem v ohybu pro určení přechodové teploty $FATT_{50}$, 135 zkušebních vzorků pro stanovení meze únavy z toho 33 klasických, 36 Small Fatigue Test, 66 ostatních mini vzorků, v oblasti creepu 33 klasických, 25 Small Punch Creep Test a 20 mini vzorků).

Pro zkoušku tahem byla ověřena metodika zkoušení pomocí mikro tahového tělesa a vyhodnocení na základě SPT. Při použití miniaturního tahového vzorku lze určit všechny charakteristiky vyhodnocované ze zkoušek tahem (R_m , $R_{p0,2}$, A , Z) a při použití optického měření deformace v průběhu testu (např. ARAMIS) je získaný záznam srovnatelný se záznamy ze zkoušek tahem na standardních tělesech. Tento způsob měření se ukázal jako vhodný pro měření lokálních vlastností z různých (kritických) míst provozovaných součástí díky výbornému souhlasu mezi výsledky naměřenými na standardních a miniaturních vzorcích. Byly provedeny zkoušky tahem u svarového spoje – návaru a mezilaboratorními zkouškami úspěšně porovnány. Výsledky ze zkoušek za použití mikro tahových vzorků nemusí na rozdíl od zkoušek Small Punch Test být nijak korelovány a mají pravděpodobně univerzální platnost pro všechny konstrukční materiály. Mikro tahové vzorky lze např. použít pro určení anizotropie tenkostěnných trubek nebo pro měření lokálních vlastností z různých (kritických) míst provozovaných součástí.

Při aplikaci metody SPT pro vyhodnocení tahových charakteristik byly nejprve na základě získaných výsledků měření na standardních a SPT vzorcích stanoveny korelační vztahy a následně byly vyhodnoceny SPT zkoušky s využitím těchto korelačních vztahů. Výsledky v těchto případech vykazovaly dobrý souhlas s výsledky standardních vzorků, což bylo očekávané vzhledem k odvození korelačních vztahů na jejich základě. Nicméně korelační vztahy jsou rozdílné pro každý ze sledovaných materiálů, což výrazně limituje použití SPT – nelze použít pro případy kdy není možné tyto korelační vztahy stanovit z důvodu nedostatku materiálu pro realizaci standardních zkoušek. Výsledky vyhodnocení tahových vlastností s využitím miniaturních vzorků prokázalo aplikovatelnost miniaturních tahových vzorků, jež poskytly výsledky plně srovnatelné se standardními vzorky bez nutnosti stanovení a následné aplikace korelace mezi vzorky různých rozměrů.

Pro posouzení odolnosti vůči křehkému lomu na základě vrubové houževnatosti byl sledován vztah mezi výsledky transičních teplot stanovených na základě standardních a miniaturních Charpy vzorků. Byl sledován vztah mezi přechodovými teplotami stanovenými pro obě uvažované geometrie. Bylo posuzováno, zda je teplotní posun konstantní pro různé materiály potvrzující rozhodující vliv geometrie na tento posun, umožňující vyhodnocení teplotního posunu platného pro širší spektrum materiálů. Výsledky na mini-Charpy tělesech použitých pro vyhodnocení $FATT_{50}$ u čtyř materiálů vykazovaly téměř konstantní teplotní posun $\Delta t = 63 (\pm 4)^\circ\text{C}$. Na základě těchto měření lze odhadnout, že teplotní posun Δt mezi $FATT_{50}$ měřenou na standardních a mini-Charpy vzorcích bude pro mnoho ocelí konstantní. Navíc tato hodnota velmi dobře koresponduje s výsledky uváděnými v literatuře např. [79]. Získané výsledky jsou velmi cenné, protože každá zkušební laboratoř má svoji databázi výsledků, které jsou její know how a jsou velmi zřídka publikovány. Pro určení přechodové teploty budou mini-Charpy tělesa určitě daleko vhodnější než SPT disky. Velkou roli při zvážení vhodnosti výběru podrozměrných těles pro určení $FATT_{50}$ hraje i fakt, že typ zatěžování je u mini-Charpy těles stejný a proto i nejistota určení korelačních vztahů je z principu menší. Také je u této metody výrazně menší pracnost.

V oblasti vysokocyklové únavy byla vyzkoušena nově navržená tělesa, ale výsledky miniaturizovaných plochých zkušebních vzorků nekorespondovaly s vypočteným koeficientem koncentrace napětí a korelačním vztahem určeným z výsledků provedených zkoušek. Toto ukazovalo na ovlivnění výsledků více parametry, než pouze vlastní geometrií a tudíž by bylo nezbytné stanovit složitější korelační vztahy, což není žádoucí vzhledem ke komplikaci se stanovením odpovídajících korelačních parametrů. Bylo proto nově navrženo válcové miniaturní zkušební těleso o průměru aktivní části 1,5mm. Výsledky z těchto vzorků byly porovnány s výsledky naměřenými na vzorcích o průměrech 4, 8 a 12mm. Získané výsledky byly velmi konzistentní a vykazovaly srovnatelné výsledky naznačující, že navržené těleso by mohlo být vhodné pro realizaci miniaturních zkoušek vysokocyklové únavy. Pro ověření navrženého přístupu je nutné realizovat v budoucnu další experimenty, potvrzující spolehlivost a oblast aplikovatelnosti navržených vzorků pro vyhodnocení vysokocyklové únavy materiálů.

V oblasti zkoušek tečení bylo úspěšně vyzkoušeno nově navržené těleso pro zkoušky tečení. Toto těleso lze vyrobit ze vzorku odebraného semidestruktivním odběrem. Výsledky provedené na třech materiálech velmi dobře korespondovaly s výsledky standardních testů. Výsledky ze zkoušek mini těles nemusí být nijak korelovány. V případě materiálu parovodu byl proveden i výpočet zbytkové životnosti jak z výsledků standardních těles, tak z výsledků mini těles a výsledek byl téměř totožný. V současné době je stále nejrozšířenější technika hodnocení zbytkové životnosti na základě zkoušek žárupevnosti. I přes svoji relativní přesnost a zejména

bohaté zkušenosti při hodnocení různých typů materiálů zůstávají její zásadní nevýhodou vysoké náklady, které je nutné vynaložit na odběr dostatečného objemu zkoumaného materiálu. K tomu se mohou vázat náklady související s dobou odstávky energetické zařízení a také náklady související s náklady na opravu po odběru materiálu určeného k výrobě vzorků vhodných pro zkoušky tečení. Pro zkrácení doby odstávky a tím snížení ekonomických ztrát je nutné se zabývat možnostmi hodnocení materiálu především pomocí nedestruktivních a semidestruktivních technik. Mezi tyto metody jsou zahrnuty způsoby hodnocení pomocí metalografických replik, či zavedení hodnocení mechanických vlastností zejména creepových zkoušek pomocí mini vzorků.

V oboru mechanického zkoušení se použití malých vzorků, které vyhodnocující mechanické charakteristiky z malého objemu experimentálního materiálu, jeví jako velmi perspektivní, zejména použití miniaturizovaných zkušebních těles, které svým charakterem odpovídají způsobu zatěžování standardních těles. Pro další výzkum v tomto oboru je možné rozšířit použití miniaturizovaných vzorků do oblastí měření mechanických vlastností, jako jsou např. creepové testy se záznamem okamžité deformace či únavové testy v oblasti nízkocyklové únavy.

Výsledky této disertační práce jsou použitelné pro hodnocení mechanických vlastností a degradace materiálů a jsou velkým přínosem zejména pro oblast energetiky při hodnocení zbytkové životnosti komponent.

14. Seznam použité literatury

- [1] Ptáček, L. a kol.: Nauka o materiálu I. Akademické nakladatelství CERM, Brno, 2001, ISBN 80 -7204 – 193 – 2 (2. opravené a doplněné vydání 2003)
- [2] Matocha, K., Hurst, R., The European Code of Practice for Small Punch Testing, The 1st International Conference SSTT, 2010, ISBN 978-80-254-7994-0, p. 5-11
- [3] Tylišav, S., Rusz, S., Influence of changes deformation on structure AlMn1Cu alloy with use SPD process, conference Metal, 18. -20. 5. 2011
- [4] Konopík, P., Kompatibilita výsledků hodnocení mechanických vlastností konstrukčních materiál, dizertační práce 2014
- [5] Roberts, P. R.: Material Sampling from Components within the Nuclear Industry and the Extraction of Useful Materials Information, The 1st International Conference SSTT, 2010, ISBN 978-80-254-7994-0, p. 19-24
- [6] KMT - Kobe Material Testing, Laboratory Group using EDSE [online], [cit. 2016-03-14]: <http://www.kmtl.co.jp/en/support>
- [7] ETD Technology Newsletter, EDSE: Innovation in 'Boat Sampling' [online], [cit. 2015-05-20]:
<https://static1.squarespace.com/static/5304e62de4b00674c06afd5c/t/555efc36e4b08ef1eb/b76245/1432288310982/May+2015+Newsletter.pdf>
- [8] CEN Workshop Agreement, Small Punch Test Method for Metallic Materials, CWA 15627:2007, December 2007
- [9] Mechanické zkoušení kovů - teoretická část, [online], prosinec 2002, [cit. 2014-02-09], http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_mechanicke_zkouseni/teorie.htm
- [10] Plastická deformace a pevnost, [online], [cit. 2014-04-15], Ústav fyziky materiálů Akademie věd České republiky: www.ipm.cz/group/fracture/vyuka/doc/P04.ppt
- [11] ČSN EN ISO 6892-1: Kovové materiály – zkoušením tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty, únor 2010
- [12] Stránský, L., Mollíková, E., Sedláček, J. Zkouška tahem, Vysoké učení technické v Brně, [online], [cit. 2014-01-19], <http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/Tahovka.pdf>
- [13] Skálová, J., Kovařík, R., Benedíkt, V., Základní zkoušky kovových materiálů, ZČU Plzeň, 3. vydání, ISBN 80 – 7082 – 623 – 1
- [14] Molíková, E., Kaláb, P. Stránský, L., Sedláček, J., Zkouška rázem v ohybu [online], [cit. 2014-11-03] <http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/umvi/zk.raz.ohybu.pdf>
- [15] ČSN ISO 148-1: Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy - Část 1: Zkušební metoda, září 2010
- [16] ČSN EN ISO 14556: Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu na kyvadlovém kladivu tyčí Charpy s V-vrubem – Instrumentovaná zkušební metoda, duben 2016
- [17] Mentl, V. Problematika křehkého lomu, Podkladové materiály pro výuku strojírenských materiálů na ZČU, 2003
- [18] Chvostová, E., Novák, M. Výsledky metalografické analýzy a mechanických zkoušek na parovodu ECHVA, VYZ 1475/12
- [19] Vlach, B. Zkoušky odolnosti ocelí proti křehkému lomu, tranzitní teploty [online], [cit. 2011-08-14]. Ústav Materiálových Věd a Inženýrství. [online], [cit. 2013-12-15] <http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/GS0/05%20-%20Mereni%20TLCH.doc>
- [20] M. P. Manahan and C. Charles, "A Generalized Methodology for Obtaining Quantitative Charpy Data from Test Specimens of Nonstandard Dimensions," Nucl., Technol. 90, 245-59 (May 1990)

- [21] <http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/5CK/prednasky/prednaska2.pdf>, FS VUT Brno, Porušování při cyklickém zatěžování, [cit. 2016-08-08],
- [22] Klesnil M. – Lukáš, P.: Únava kovových materiálů při mechanickém namáhání, Academia, Praha 1975.
- [23] Růžička, M.: Kritéria a postupy při posuzování únavové pevnosti a životnosti konstrukcí, http://mechanika2.fs.cvut.cz/sources_old/pzk/obsah.html, [cit. 2016-08-12],
- [24] www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/VZM8_UnavaMaterialu.pdf, [cit. 2016-08-12],
- [25] Chvostová, E.: Staircase Fatigue for Sanborn a.s., Technická zpráva TZ 53/15/026, VZÚ Plzeň
- [26] Mentl, V.: Nedestruktivní zkoušky tečení a relaxace, texty k přednáškám z DPZ, ZČU Plzeň 2003
- [27] Norma ČSN EN ISO 204 Kovové materiály - Zkoušení tečení jednoosým tahem - Zkušební metoda z 1. 10. 2009
- [28] http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/mezni_stavy/prednasky/10_6MS_creep.pdf
- [29] Chvostová, E.: Žárupevnost zkušebních svarových spojů ocelí typu P91 a P92, VYZ 1145/08
- [30] Jakobová, A.: Speciální zkušební metody, učební texty, Ostrava 1995
- [31] Kříž, A.: Lomy při tečení, texty ke cvičení, ZČU 2007
- [32] Konopík, P., Džugan, J., Determination of Tensile Properties of Low Carbon Steel and Alloyed Steel 34CrNiMo6 by Small Punch Test and Micro-Tensile Test, The 2nd International Conference SSTT, 2012, ISBN 978-80-260-0079-2,
- [33] Matocha, K., Filip, M. Hodnocení aktuálních křehkolomových vlastností energetických zařízení pomocí penetračních testů, Korozie a ochrana materiálu, 2007
- [34] Hurst, R., Matocha, K. The European Code of Practice for Small Punch Testing, The 1st International Conference SSTT, 2010, ISBN 978-80-254-7994-0, p. 5-11
- [35] Purmenský, J., Matocha, K. Zkoušení pomocí malých vzorků ve fyzikální metalurgii, konference Metal, 15. -17. 5. 2001
- [36] Manahan, M., Argon, A., Harling, O., The development of a miniaturized disk bend test for the determination of post-irradiation mechanical properties, Journal of Nuclear Materials, 1981, p. 1545-1550
- [37] Mao, X., Saito, M., Takahashi, H., Small Punch Test to predict ductile fracture toughness J_{IC} and brittle fracture toughness K_{IC} , Scripta Metallurgica et Materialia, 1991, p. 2481-2485
- [38] Foulds, J. R., Woytowicz, P. J., Fracture Toughness by Small Punch Testing, Journal of Testing and Evaluation, 1995, p. 3-10
- [39] Kupča, L., Václavková, J., Application of the Small Punch Test Methods for The Mechanical Properties Evaluation, konference Metal, 15. -17. 5. 2001
- [40] Du, P, Ling, X., Zhou, Z., Study of Influence Factor of Small Punch Test to Estimate the Yield Strength by Energy Method, The 1st International Conference SSTT, 2010, ISBN 978-80-254-7994-0, p. 133-137
- [41] WANG, Z., X.: Small Punch Testing for Assessing The Fracture Properties of The Reactor Vessel Steel With Different Thicknesses, Nuclear Engineering and Design, Volume 238, Issue 12, December 2008, p. 3186-3193
- [42] Li, Y., Hurst, R., New Approach to Determine Fracture Toughness from the Small Punch Test, The 1st International Conference SSTT, 2010, ISBN 978-80-254-7994-0, p. 94-102
- [43] Buloch, J., H., A Study Concerning Material Fracture Toughness and Some Small Punch Test Data for Low Alloy Steels, Engineering Failure Analysis 11, 2004

- [44] Matocha, K., Purmenský, J., Non Destructive Evaluation of Mechanical Characteristics of In - service Components' Materials by Small Punch Tests, NDT for Safety, November 07–09, 2007, Prague, Czech Republic
- [45] Purmenský, J., Matocha, K., Zkoušení pomocí malých vzorků ve fyzikální metalurgii, METAL 2001, 15. - 17. 5. 2001, Ostrava, Czech Republic
- [46] Okada, A., Yoshie, Y., Kojima, S., Abe, K., Kiritani, M.: Correlation Among a Variety of Miniaturized Mechanical Tests and Their Application to D-T Neutron-Irradiated Metals. Journal of Nuclear Materials, Vol. 133 + 134 (1985), s. 321
- [47] Kristofory, F., Mikuláš, D., Kander, L., Evaluation of Mechanical Properties And Wear Resistant of Electrodeposited Composite Coatings With Nano-size Particles, Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava číslo 1, 2006, ročník LII, řada strojní, článek č. 1508
- [48] Matocha, K., Kuboň, Z., Ductile-brittle Transition Behavior of Circumferential Weld of Reheater Header Determined by Small Punch Test, The 1st International Conference SSTT, 2010, ISBN 978-80-254-7994-0, p. 103-107
- [49] GAI X., SATO Y. S., KOKAWA H., ICHIKAWA K., Ductile - brittle Transition of Steel Electron Beam Weld, Metal in Small Punch Test. Science and Technology of Welding and Joining, 2002, Vol. 7, No. 4, p. 204.
- [50] Kander, L., Filip, M.: Hodnocení materiálových vlastností kotlového tělesa po dlouhodobém provozu metodou malých vzorků, METAL 2006, 23. -25. 5. 2006, Hradec nad Moravicí
- [51] Li, Y., Vulpen, R., Comparison with Fracture Toughness Derived from Charpy-V and Small Punch Tests, The 2st International Conference SSTT, 2012, ISBN 978-80-260-0079-2, p. 210
- [52] Buloch, J., H., Toughness Losses In Low Alloy Steels at High Temperatures: An Appraisal of Certain Factors Concerning The Small Punch Test, International Journal of Pressure Vessels and Piping 75, 1998, p. 791–804
- [53] Saucedo-Munoz, M. L. et al.: Correlation between JIC and equivalent fracture strain determined by small-punch tests in JN1 JJ1 and JK2 austenitic stainless steels, Cryogenics 41 (2001), p. 913-719.
- [54] Shindo, Z. - Zamaguchi, Z. – Horiguchi, K.: Small punch testing for determining the cryogenic fracture properties of 304 and 316 austenitic stainless steels in a high magnetic field, Cryogenics, Volume 44, Issue 11, November 2004, p. 789-792
- [55] Bicego, V.: Suggested parts to be put in the ECCC WG1.1 report on miniature creep testing, CESI 2003
- [56] Bicego, V., Matocha, K., Abendroth, M.: Small Punch Test Method for Metallic Materials 2005
- [57] Hluchý, M., a kol.: Strojírenská technologie I, SNTL 1971
- [58] Serensen, S, V., Kogajev, V., P.: Únosnost a pevnostní výpočty strojních součástí, SNTL 1965
- [59] Kuboň, Z.: Small sampling test method, Vítkovice-Research and Development, Ltd., 2005
- [60] Lacale, R., Alvarez, J., Small Punch Testing for Tensile and Fracture Behavior, The 1st International Conference SSTT, 2010, ISBN 978-80-254-7994-0, p. 59-68
- [61] Klevtsov I., Dedov A., Molodtsov A., Using of Small Punch Test for Determination of Tensile Properties for Power Plant Steels, 6th International DAAAM Baltic Conference Industrial Engineering 24-26 April 2008, Tallinn, Estonia

- [62] Song, S., H., Faulkner, R., G., Marny, P., Small Punch Test Evaluation of Neutron-Irradiation-Induced Embrittlement of Cr-Mo Low-Alloy Steel, *Materials Characterization* 53, 2004, p. 35– 41
- [63] Ruan, Y., Spatig, P., Victoria, M. Assessment of mechanical properties of the martensitic steel EUROFER97 by means of punch tests, *Journal of Nuclear Materials*, 2002, p. 307-311
- [64] ČSN 415128, Ocel 15 128 Cr-Mo-V, 4. 12. 1984
- [65] Interní postup POS-ZL/52/008 mezinárodní Neubauerova klasifikace
- [66] Chvostová, E.: Výsledky zkoušek mechanických vlastností, metalografie a chemického rozboru tělesa skříně Seinajoki části B projektu TAČRTA04021166, VYZ-VZ-53/15/074
- [67] Materiálová specifikace Tp 0010M rev. 4. Modifikovaná ocel X12CrNiMoV12-3
- [68] Francisko P., Únavové vlastnosti materiálu stanovené pomocí malých vzorků, ZČU Plzeň 2003
- [69] Rund, M., Konopík, P., Dzugan, J.: Dynamic Tensile And Micro-Tensile Testing Using DIC Method, *Metal 2014*, May 21st – 23rd 2014, Brno, Czech Republic, ISBN 978-80-87294-52-9.
- [70] Sokolov, M., A., Nanstad R. K., On impact testing of subsize charpy v-notch type specimens, *Effects of Radiation on Materials*, 17th International Symposium, p406, August 1996, ISBN: 0-8031-2016-8, ISSN: 1050-7515
- [71] Konopík, P., Viehrig, H. W., Fracture Toughness Characterization of the Martensitic Chromium Steel P91, *Comat 2012*, Plzeň, ISBN: 978-80-87294-34-5
- [72] Matocha, K.:The Evaluation of Circumferential Weld of Reheater Header by Small Punch Punch Tests, *COMAT 2010*, Plzeň, pp. 91-92 + CD, ISBN 978-80-254-8683-2.
- [73] Konopík, P., Rund, M., Dzugan, J., Prochazka, R.: Determination of Current Mechanical Properties of Components in Service Using Sub Sized Specimens, *Baltica X - 2016 - Life Management and Maintenance for Power Plants*, Helsinki (FIN), 7 – 9 June 2016
- [74] J. Koutsky: *Steels for Power Engineering*. Prague: SNTL, 1981, 337 s
- [75] Bunda, Z., Chvostová, E: Výsledky metalografie a mechanických zkoušek parovodu - ECHVA, VYZ TZ-53/14/013
- [76] Matocha, K., Strnadel, B.: Hodnocení vrubové houževnatosti pomocí malých nestandardizovaných zkušebních těles, online [citace 2014, 06,09]
- [77] Milička, K., Dobeš, F.: Použití techniky malých vzorků pro hodnocení mechanických vlastností moderních kovových materiálů, *Ústav fyziky materiálů AV Ř, Brno 2002*
- [78] Norma ŠN 42 2747
- [79] Walin, K.: *Fracture Toughness of Engineering Materials*, ISBN: 978 0 9552994 6 9
- [80] Volák, J.; Mentl, V.: Vliv tvaru vzorku typu „Small Punch“ na výsledky zkoušek únavy, výzkumná zpráva ŠKODA VÝZKUM s.r.o., VYZ 1212/2009, Plzeň, prosinec 2009
- [81] Kindelman, P., Rozvoj metodiky stanovování mechanických vlastností pomocí malých vzorků VYZ-VZ-53/15/044
- [82] Chocholoušek, M., Volák, J.: Stanovení únavových charakteristik oceli P92, VZ 1373/11
- [83] Volák, J.: akustická emise, dizertační zpráva 2015

15. Seznam obrázků

Obr. 1 Základní typy tahových diagramů [12]	11
Obr. 2 Příklad zkušebního tělesa pro zkoušku tahem [12]	12
Obr. 3 Vyhodnocení smluvní meze kluzu [10]	12
Obr. 4 Dolní a horní meze kluzu [10]	13
Obr. 5 Uspořádání zkoušky rázem v ohybu metodou Charpy [15]	15
Obr. 6 Geometrie zkušebního tělesa pro zkoušky rázem v ohybu metodou Charpy – V vrub	15
Obr. 7 Geometrie mini-Charpy tělesa pro zkoušky rázem v ohybu	16
Obr. 8 Způsob vyhodnocení křehkého lomu z lomové plochy [19]	17
Obr. 9 Příklad hodnocené lomové plochy s 56% BF vlevo a 95% BF vpravo [75]	17
Obr. 10 Příklad určení přechodové teploty $FATT_{50}$ [75]	18
Obr. 11 Odlišné případy chování dvou různých ocelí, které vykazují stejné hodnoty KV [14] ...	19
Obr. 12 Stanovení charakteristických hodnot síly při zkoušce rázem v ohybu [16]	19
Obr. 13 Schéma únavového lomu [1]	21
Obr. 14 Válcové zkušební vzorky pro únavové zkoušky [1]	21
Obr. 15 Veličiny únavového zátěžného cyklu	22
Obr. 16 Wöhlerova křivka při symetrickém zátěžném cyklu [17]	24
Obr. 17 Příklad vlivu kvality povrchu na mez pevnosti	25
Obr. 18 Příklad vyhodnocení meze únavy metodou Staircase Fatigue Test [25]	26
Obr. 19 Manson – Coffinova křivka [23]	27
Obr. 20 Křivky tečení [26]	29
Obr. 21 Závislost působícího zatížení a doby do lomu součásti při různých teplotách [26]	30
Obr. 22 Schematické znázornění vzniku zárodku trhliny r-typu	33
Obr. 23 Model vzniku trhlín w – typu [31]	33
Obr. 24 Různé obměny jednoduchého mechanismu vzniku trhlín w – typu [31]	34
Obr. 25 Schéma zařízení pro zkoušky tečení [26]	35
Obr. 26 Zařízení pro zkoušky tečení [28]	35
Obr. 27 Ukázka používaných zkušebních tyčí pro creepové zkoušky	36
Obr. 28 Zkušební těleso po zkoušce tečení [29]	37
Obr. 29 Příklad výsledků zkoušek tečení homogenní svarového spoje oceli P91 [29]	40
Obr. 30 Schematické znázornění odběru pomocí zařízení SSam TM -2 fy Rolls-Royce [5]	41
Obr. 31 Odběrové zařízení SSam TM -2 [5]	41
Obr. 32 Disky pro testy SPT odebrané ze zkušebního materiálu [33]	42
Obr. 33 Odběrové zařízení EDSE, odebraný vzorek a z něj vyrobitelná miniaturní tělesa [7]	43
Obr. 34 Polotovar pro výrobu mini-Charpy těles, vlevo - po zavaření, vpravo – broušený na rozměr	44
Obr. 35 a) Odebraný vzorek pomocí EDSE b) Hloubka ovlivněné vrstvy [66]	44
Obr. 36 Příklad návrhu umístění zkušebních tyčí v odebraném vzorku materiálu [4]	45
Obr. 37 Přípravek pro zkoušky SPT [33]	47
Obr. 38 Příklad uspořádání SPT 160	48
Obr. 39 Zkušební disk používaný pro zkoušky SPT	48
Obr. 40 Příklad záznamu SPT pro nízkouhlikovou ocel [39]	49
Obr. 41 Charakteristický záznam pro SPT s vyznačenými body pro vyhodnocení [8]	50
Obr. 42 Experimentální křivka $F(u)$ a proložená bilineární funkce $f(u)$ [8]	51
Obr. 43 Alternativní přístup vyhodnocení F_e [40]	52
Obr. 44 Schéma postupu měření nejmenší tloušťky po zkoušce SPT [8]	53

Obr. 45 Vzorek z materiálu 16 363 porušený při pokojové teplotě [4].....	53
Obr. 46 Vztah mezi $\ln(h_0/h_f)$ a $\ln(u_f/h_0)$ pro rotorovou CrMoV ocel [44].....	54
Obr. 47 Korelace mezi mezí kluzu a zatížením F_e u SPT [40]	55
Obr. 48 Korelace meze pevnosti na normalizované maximální síle při SPT [47]	56
Obr. 49 Příklad chování materiálu při SPT za různých teplot [52]	57
Obr. 50 Posun tranzitní teploty pro ocel vyhodnocené ze SPT a ze standardních Charpy těles 10x10x55 mm užitím metody $FATT_{50}$ [44]	57
Obr. 51 Definice geometrických parametrů [55], [56].....	58
Obr. 52 Příklad mikrostruktury parovodu	61
Obr. 53 Náčrt umístění zkušebních tyčí pro tah, creep a KV.....	61
Obr. 54 Makrostruktura řezu ze skříně tělesa.....	62
Obr. 55: Mikrostruktura vzorku č. 1.....	64
Obr. 56 Odběr vzorku odběrovým zařízením EDSE.....	64
Obr. 57 Boat sample odebraný vzorek	65
Obr. 58 Boat Sample, vpravo svisle rovný okraj, zv. 50x.....	66
Obr. 59 Boat Sample, Detail z obr. 58, zv. 500x.....	66
Obr. 60 Boat Sample, vpravo svisle je rovný okraj, zv. 100x.....	67
Obr. 61 Boat Sample, vlevo svisle je zaoblený okraj, zv. 50x.....	67
Obr. 62 Boat Sample, detail z levé části obr. 58, zv. 500x	68
Obr. 63 Mikrostruktura materiálu 15Ch2NMFA	69
Obr. 64 Směr odběru vzorků	70
Obr. 65 Mikrostruktura vzorku materiálu T552 (zvětšení 200x)	71
Obr. 66 Makro svarového spoje	72
Obr. 67 Mikrostruktura ZM (zvětšení 100x	73
Obr. 68 Mikrostruktura přechodové oblasti, ZM vlevo, SK vpravo (zvětšení 200x)	73
Obr. 69 Mikrostruktura svarového kovu (zvětšení 200x)	74
Obr. 70 Umístění zkušebních tyčí ve svarovém spoji	74
Obr. 71 Porovnání jednotlivých zkušebních vzorků	76
Obr. 72. Zkušební tyče pro zkoušku tahem.....	76
Obr. 73. SP Test přípravek rozložený [28] Obr. 74. SP Test přípravek složený [28]	77
Obr. 75 Uspořádání zkoušky ve zkušební stroj Zwick – Z250	78
Obr. 76 Geometrie zkušebního tělesa pro mikro tahovou zkoušku	78
Obr. 77 Sestavení zkoušky pro mikro vzorek	79
Obr. 78 Grafický záznam mikro tahových zkoušek pro materiál 15 128.....	80
Obr. 79 Grafický záznam zkoušek SP pro materiál 15 128	82
Obr. 80 Příklad záznamu pro vyhodnocení zkoušek SPT pro materiál 15 128.....	82
Obr. 81 Porovnání meze pevnosti a kluzu.....	83
Obr. 82 Grafický záznam zkoušek pro svarový spoj.....	84
Obr. 83 Grafický záznam mikro tahových zkoušek	85
Obr. 84 Porovnání meze pevnosti a kluzu v oblasti návaru	86
Obr. 85 Porovnání klasického zkušebního vzorku a vzorku mini Charpy	87
Obr. 86. Rozměry zkušebního mini vzorku	87
Obr. 87 Vyhodnocení přechodové teploty $FATT_{50}$ pro materiál 15 128, klasické vzorky	89
Obr. 88 Lomové plochy standardních zkušebních vzorků [75]	89
Obr. 89 Vyhodnocení přechodové teploty $FATT_{50}$ pro materiál 15 128, mini Charpy	91
Obr. 90 Záznamy instrumentovaných zkoušek mini Charpy z materiálu 15 128.....	91
Obr. 91 Vyhodnocení přechodové teploty $FATT_{50}$ pro materiál ŠN 42 2747	93

Obr. 92 Vyhodnocení přechodové teploty <i>FATT</i> ₅₀ pro materiál ŠN 42 2747 pomocí mini Charpy	95
Obr. 93 Vyhodnocení přechodové teploty <i>FATT</i> ₅₀ pro svarový spoj oblast TOO pomocí klasických zkušebních těles.....	97
Obr. 94 Vyhodnocení přechodové teploty <i>FATT</i> ₅₀ pro materiál ŠN 42 2747 pomocí mini Charpy	99
Obr. 95 Vyhodnocení přechodové teploty <i>FATT</i> ₅₀ pro materiál ŠN 42 2747 pomocí Charpy ...	101
Obr. 96 Vyhodnocení přechodové teploty <i>FATT</i> ₅₀ pro materiál ŠN 42 2747 pomocí mini Charpy	103
Obr. 97 Použité klasické zkušební tyče pro zkoušky únavy - aktivní část Ø 3mm.....	104
Obr. 98 Zkušební těleso pro zkoušku únavy, Small Fatigue Test [68]	105
Obr. 99 Příklad odebraného vzorek materiálu s umístěním zkušebních tyčí	105
Obr. 100 Geometrie malého plochého vzorku pro zkoušky únavy	106
Obr. 101 Rozměr malého vzorku označeného R10.....	107
Obr. 102 Rozložení napětí na malém vzorku R10	108
Obr. 103 Rozměr malého vzorku označeného R15.....	108
Obr. 104 Rozložení napětí na malém vzorku R15	109
Obr. 105: Vlevo vysokofrekvenční pulsátor Zwick/Roell – Amsler 10 HFP 5100, vpravo zkušební tělesa typ motýlek pro zkoušku únavy před a po porušení [80]	110
Obr. 106: Mechanické čelisti pro miniaturizované zkoušky, schéma čelistí, [80].....	110
Obr. 107: Počítačová simulace únavového porušení miniaturních zkušebních těles v porovnání s realitou [80]	111
Obr. 108 Zkušební vzorky po zkoušce únavy	113
Obr. 109 Návrh nového zkušebního vzorku pro zkoušku únavy	113
Obr. 110 Wöhlerova křivka z výsledků všech zkušebních tyčí bez přepočtu koncentrace napětí	115
Obr. 111 Wöhlerova křivka z výsledků všech zkušebních tyčí s přepočtem koncentrace napětí	116
Obr. 112 Příklad měření drsnosti na zkušebním vzorku	117
Obr. 113 Vzorek č. 1 a místa měření drsnosti na zkušebním vzorku.....	117
Obr. 114 Vzorek č. 2,3 a místa měření drsnosti na zkušebním vzorku.....	118
Obr. 115 Řez lopatkou s vyznačením míst pro hodnocení mikrostruktury.....	119
Obr. 116 Mikrostruktura míst označených 3, 2,1	119
Obr. 117 Náčrt měření tvrdosti přes řez lopatky	120
Obr. 118 Záznam měření tvrdosti HV1 přes průřez lopatky	120
Obr. 119 Wöhlerova křivka z výsledků všech zkušebních tyčí bez přepočtu koncentrace napětí	123
Obr. 120 Wöhlerova křivka z výsledků všech zkušebních tyčí s přepočtem koncentrace napětí	124
Obr. 121 Wöhlerova křivka z výsledků všech zkušebních tyčí bez přepočtu koncentrace napětí	126
Obr. 122 Tvar zkušebního tělesa.....	127
Obr. 123 Vzorek typu lodička a tvar miniaturních zkušebních těles	127
Obr. 124 Tvar zkušebního kruhového vzorku.....	128
Obr. 125 Zkušební tělesa o průměru zleva 1,5, 4, 8, a 12mm.....	129
Obr. 126 Grafický záznam výsledků všech zkušebních tyčí.....	131
Obr. 127 Použité zkušební vzorky pro zkoušky tečení	133
Obr. 128 Standardní zkušební tyč pro zkoušky tečení	134

Obr. 129	Geometrie miniaturního zkušebního tělesa pro zkoušky tečení.....	134
Obr. 130	Návrh umístění zkušebních tyčí v odebraném vzorku materiálu	135
Obr. 131	Standardní stroje pro zkoušky tečení	135
Obr. 132	Zařízení, speciálně upravené pro SPT creep testy.....	136
Obr. 133	Panel regulátorů pecí.....	137
Obr. 134	Měřicí ústředna.....	137
Obr. 135	Uspořádání zkoušky tečení - klasický vzorek	138
Obr. 136	Uspořádání zkoušky tečení - SPT vzorek	138
Obr. 137	Uspořádání zkoušky tečení - mini vzorek.....	139
Obr. 138	Stav po zkoušce tečení mini vzorku.....	139
Obr. 139	Zkušební tělesa po provedené zkoušce tečení.....	140
Obr. 140	Příklad záznamu zkoušky tečení zkušebního SPT vzorku č.SP 8.....	142
Obr. 141	Příklad záznamu zkoušky tečení zkušebního SPT vzorku č.SP 10.....	142
Obr. 142	Porovnání výsledků jednotlivých zkoušek pro materiál č. 1 15 128 po provozu	143
Obr. 143	Výsledky klasických zkoušek a mini vzorků pro určení LM parametru	144
Obr. 144	Příklad záznamu zkoušky tečení zkušebního SPT vzorku č. SP1	147
Obr. 145	Porovnání výsledků jednotlivých zkoušek pro materiál ŠN 42 2747 po provozu	147
Obr. 146	Příklad záznamu zkoušky tečení zkušebního SPT vzorku č. SP 1	149
Obr. 147	Příklad záznamu zkoušky tečení zkušebního SPT vzorku č. SP 3.....	150
Obr. 148	Porovnání výsledků jednotlivých zkoušek pro materiál č. 3, svarový spoj	151

16. Seznam tabulek

Tab. 1 Příklad rozsahu zkoušek tečení heterogenního svarového spoje [29].....	39
Tab. 2 Charakteristické rozměry přípravku a zkušebního disku pro zkoušky SPT[29].....	48
Tab. 3 Chemické složení parovodu.....	63
Tab. 4 Chemické složení vršku i spodku tělesa.....	64
Tab. 5 Průběh tvrdosti HV0,5	65
Tab. 6 Chemické složení materiálu 15Ch2NMFA.....	70
Tab. 7 Chemické složení materiálu lopatky.....	
Tab. 8 Výsledky zkoušky tahem dle ČSN EN ISO 6892-1.....	72
Tab. 9 Výsledky zkoušky rázem v ohybu dle ČSN ISO 148-1.....	72
Tab. 10 Výsledky měření tvrdosti dle ČSN EN ISO 6506-1.....	72
Tab. 11 Hodnoty mikročistoty dle ASME	73
Tab. 12 Chemické složení návaru.....	74
Tab. 13 Výsledky zkoušek tahem.....	77
Tab. 14 Výsledky zkoušek rázem v ohybu	77
Tab. 15 Výsledky průběhu tvrdosti HV10 přes svarový spoj, vzdálenost vtisků byla 1mm.....	77
Tab. 16 Naměřené hodnoty klasických zkoušky z oceli 15 128.....	85
Tab. 17 Naměřené hodnoty pro mikro vzorky z oceli 15 128.....	86
Tab. 18 Naměřené hodnoty SPT zkoušky z oceli 15 128.....	87
Tab. 19 Naměřené hodnoty standardních zkoušek.....	
Tab. 20 Naměřené hodnoty mikro-tahových zkoušek – zkušebna 1 (VZU).....	89
Tab. 21 Naměřené hodnoty mikro-tahových zkoušek – zkušebna 2 (COMTES).....	90
Tab. 22 Výsledky zkoušky rázem v ohybu na standardních zkušebních tělesech [75].....	91
Tab. 23 Výsledky zkoušky rázem v ohybu materiálu 15 128, mini vzor.....	92
Tab. 24 Výsledky zkoušky rázem v ohybu na standardních zkušebních tělesech	94
Tab. 25 Výsledky zkoušky rázem v ohybu na mini Charpy pro materiál ŠN 42 2747	96
Tab. 26 Výsledky zkoušky rázem v ohybu – TOO,	98
Tab. 27 Výsledky zkoušky rázem v ohybu na mini Charpy pro svarový spoj oblast TOO	100
Tab. 28 Výsledky zkoušky rázem v ohybu – návar,	102
Tab. 29 Výsledky zkoušky rázem v ohybu na mini Charpy pro svarový spoj oblast návaru....	104
Tab. 30 Výsledky přechodové teploty FATT50.....	106
Tab. 31 Výsledky zkoušek únavy na klasických zkušebních tělesech.....	113
Tab. 32 Výsledky zkoušek únavy na zkušebních tělesech motýlek Small Fatigue Test vyrobených pomocí drátořezu	114
Tab. 33 Výsledky zkoušek únavy na zkušebních tělesech motýlek Small Fatigue Test vyrobených pomocí vodního paprsku	115
Tab. 34 Výsledky zkoušek únavy na nových zkušebních tělesech s vybráním R15	116
Tab. 35 Výsledky zkoušek únavy na nových zkušebních tělesech s vybráním R10	116
Tab. 36 Souhrn meze únavy pro jednotlivá zkušební tělesa	118
Tab. 37 Výsledky měření drsnosti.....	120
Tab. 38 Výsledky zkoušek únavy na standardních zkušebních tělesech.....	125
Tab. 39 Výsledky zkoušek únavy na zkušebních tělesech s vybráním R15.....	126

Tab. 40	Výsledky zkoušek únavy na zkušebních tělesech s vybráním R10.....	127
Tab. 41	Výsledky zkoušek únavy na zkušebních tělesech SFT.....	127
Tab. 42	Stanovení meze únavy	130
Tab. 43	Výsledky zkoušek únavy na zkušebních tělesech R15 pro oblast TOO	131
Tab. 44	Výsledky zkoušek únavy na zkušebních tělesech R15 pro oblast návaru.....	132
Tab. 45	Výsledky zkoušek únavy materiálu č. 3 – návar	133
Tab. 46	Výsledky zkoušek únavy na standardních zkušebních tělesech.....	134
Tab. 47	Výsledky zkoušek únavy na standardních zkušebních tělesech	135
Tab. 48	Výsledky zkoušek tečení na klasických zkušebních tyčích	144
Tab. 49	Výsledky zkoušek tečení na mini vzorcích	144
Tab. 50	Výsledky zkoušek tečení na SPT vzorcích	145
Tab. 51	Porovnání hodnot tažnosti A[%] klasických vzorků a mini vzorků.....	149
Tab. 52	Výsledky zkoušek tečení na klasických zkušebních tyčích.....	150
Tab. 53	Výsledky zkoušek tečení na mini vzorcích	150
Tab. 54	Výsledky zkoušek tečení na SP vzorcích	150
Tab. 55	Výsledky zkoušek tečení na klasických vzorcích	151
Tab. 56	Výsledky zkoušek tečení na mini vzorcích	152
Tab. 57	Výsledky zkoušek tečení na SPT vzorcích	153

17. Seznam publikací

1. Chvostová, E., Kanta, V., Volák, J.: Využití techniky protlačování malých vzorků (Small Punch) Pro hodnocení mechanických vlastností ocelí, Zvyšování životnosti energetických komponent v tepelných elektrárnách, Srní 23-25. 10. 2006 ISBN 80-239-7878-0
2. Kanta, V., Chvostová, E.: Dlouhodobé vlastnosti 10% chromových ocelí používaných na části parních turbin, Zvyšování životnosti energetických komponent v tepelných elektrárnách, Srní 22-24. 10. 2007, ISBN 978-80-254-0429-9
3. Kanta, V., Chvostová E., Folková E.: Svarové spoje oceli typu P91, žárupevnost, Škoda Výzkum pro inovace, 100 let výzkumu v Plzni, ISBN 80-239-9207-6
4. Chvostová, E: Small Punch test a hodnocení křehkolomových vlastností ocelí, Únava a lomová mechanika 2008, Žinkovy, ISBN 978-80-7043-679-0
5. Kasl, J., Jandová, D., Chvostová, E., Folková, E.: Rozvoj mikrostruktury svarového spoje z oceli P92 po creepových zkouškách. Sb. 4.konference: Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v tepelných elektrárnách, str. 125-128, redigovali M. Chocholoušek a V. Liška. Srní, 20.-22.10.2009. ISBN 978-80-7043-827-5.
6. Chvostová, E: Porovnání únavových charakteristik získaných na klasických a miniaturních vzorcích z broze, Únava a lomová mechanika 2010, Žinkovy 12-15. 4.2 2010, ISBN 978-80-7043-885-
7. Jandová, D., Kasl, J., Chvostová, E: Causes of failure of weld joint during long time creep testing, METAL 2010, 18-20.5.2010, Rožnov pod Radhoštěm.
8. Jandová, D., Kasl J., Chvostová E.: Creep Resistance of Weld Joint of Tube Made of P92 Steel, METAL 2010, 18-20.5.2010, Rožnov pod Radhoštěm
9. Bunda, Z., Chvostová, E., Volák, J.: Assesment of remaining lifetime of the boiler tube and microstructure analysis, International Conference on Life Management and Maintenance for Power Plants, Baltica 2013, Helsinky (FIN) 11. - 13. 6. 2013
10. Jandová, D., Kasl J., Chvostová E.: Evaluation of mechanical properties and microstructure of dissimilar Šeld joint of COST F and FB2 steels after longterm creep test, International Conference on Life Management and Maintenance for Power Plants, Baltica 2013Helsinky (FIN) 11. - 13. 6. 2013
11. Chvostová, E, Novák, M., Volák, J., Chocholoušek, M.: Stanovení únavových charakteristik materiálu P92, Zvyšování životnosti energetických komponent v tepelných elektrárnách, Srní 22 - 24. 10. 2013, ISBN 978-80-261-0272-4
12. Chvostová, E, Bunda, Z., Volák, J.: Comparsion of results correlations of the steels P91, P92 and 15 313 after creep SP test, ISBN 978-80-87294-39-0, METAL 2013, Brno 15.-17. 5. 2013
13. Volák, J., Bunda, Z., Chvostová, E.: Assesment of remaining lifetime of the boilertube and microstructure analysis, 5. -7. 5. 2014, Roma, Italy
14. Chvostová, E.: Srovnání výsledků zkoušek mechanických vlastností klasických zkušebních těles a mini vzorků v oblasti vysokocyklové únavy a zkoušek tečení, Kotle a energetická zařízení 2016, Brno 14. 3. – 16. 3. 2016

15. Kasl, J., Jandová D., Chvostová, E.: The structure stability of weld joint of P92 and CB2 steels at creep conditions, Baltica X - 2016 - Life Management and Maintenance for Power Plants, Helsinky (FIN), 7 – 9 June 2016

Výzkumné zprávy:

1. Mentl, V., Chocholoušek M., Chvostová, E.: HCF – fatigue analysis, VYZ-TZ 53/62/07
2. Chvostová, E., Kanta, V.: Moderní chromové ocele pro parní turbíny se zvýšenými parametry páry, (závěrečná zpráva projektu 1P05OC021), VYZ 1146/08
3. Chvostová E., Žárupevnost zkušebních svarových spojů ocelí typu P91 a P92, VYZ 1145/08
4. Chvostová, E., Kanta V.: Zbytková životnost parovodů u kotle K3 a turbogenerátoru TG9 společnosti Energetika Kladno, s.r.o., VYZ 1064/08
5. Mentl, V., Volák, J., Chvostová, E., Fiala, J., Chocholoušek, M., Hadrava, J., Výsledky měření rtg-difrakce slitin po zkouškách únavy, VYZ 1124/2008
6. Volák, J., Mentl, V., Chvostová, E.: „Small Punch Test“, Využití SP testu při creepu a hodnocení zbytkové životnosti, Vypracováno v rámci řešení projektu MPO č. FT-TA2-019 VYZ 1125/2008
7. Chvostová, E., Volák, J.: Relaxace materiálu Inconel, VYZ 1147/08
8. Volák, J., Chocholoušek, M., Mentl, V., Chvostová, E.: Využití instrumentovaných zkoušek tvrdosti při hodnocení mechanických vlastností ocelí, VYZ 1126/2008
9. Chocholoušek, M., Mentl, V., Chvostová, E.: Mechanické vlastnosti a lomová houževnatost oceli 17 455 na obruče rotorů turbogenerátorů, VYZ/TZ 53/23/2008
10. Chocholoušek, M., Mentl, V., Chvostová, E.: Mechanické vlastnosti hřídele po tepelném zpracování – optimalizace zušlechťení, VYZ/TZ 53/25/2008
11. Volák, J., Mentl, V., Chvostová, E., Sobol, O.: „Small Punch Test“ – Hodnocení lomové houževnatosti, VYZ 1127/2008
12. Chvostová, E.: Experimentální zkoušky pro zjištění odezvy ultrazvukové amplitudy v závislosti na velikosti nakmitané trhliny VYZ/TZ 53/110/2009
13. Mentl, V., Volák, J., Chvostová, E. : Provádění zkoušek Small Punch v chladicí komoře, VYZ 1210/2009
14. Chvostová, E.: Posouzení zbytkové životnosti materiálu trubek přehříváku páry PP III, (Druhý šotový přehřívák), výzkumná zpráva VYZ 1225/09,
15. Chvostová E.: Moderní chromové ocele pro parní turbíny se zvýšenými parametry páry, (5. část výsledků spolupráce COST 536, závěrečná zpráva projektu OC 09053), VYZ 1224/09
16. Chvostová, E.: Výsledky mechanických zkoušek bronzí a mědi, VYZ/TZ 53/200/10
17. Chvostová, E., Chocholoušek, M.: Dynamické zkoušky svařovaných rotorů – zkušební spoje No2.5-09 a 2. 8. 09, VYZ/TZ 53/205/10
18. Chvostová, E.: Únavové zkoušky oceli AK1TD a T552, VYZ/TZ 53/221/105
19. Chvostová, E., Chocholoušek, M.: Dynamické zkoušky svarového spoje pro heterogenní kombinaci COST F + COST FB2, VYZ 1386/11

20. Chvostová, E. : Žáropevnost svarového spoje pro heterogenní kombinaci COST F a FB2, VYZ 1387/11
21. Chvostová, E, Chocholoušek, M., Mentl, V., Volák, J.: Hodnocení mechanických vlastností konstrukčních materiálů prostřednictvím miniaturních zkušebních těles, VYZ 1374/11
22. Chvostová, E: Creepová expozice dutého rotorového vodiče, VYZ/TZ 53/267/11
23. Chvostová, E: Zkoušky materiálu A1, Počerady - NT díl, VYZ/TZ 53/278/11
24. Chvostová, E, Novák, M.: Výsledky metalografické analýzy a mechanických zkoušek na parovodu ECHVA, VYZ 1475/12
25. Bunda, Z., Chvostová, E: Výsledky metalografie a mechanických zkoušek parovodu ECHVA, VYZ TZ-53/14/013
26. Chvostová, E: Mechanical properties and chemical analysis supplied fasteners, Seele s.r.o., VYZ TZ-53/13/094
27. Chvostová, E.: CTOD Fracture Toughness Testing of P40 Plate, TZ 53/13/053
28. Chvostová, E.: CTOD Fracture Toughness Testing of P70 Plate, TZ 53/13/058
29. Chvostová, E.: Testování vzorků oceli ze stožáru vedení V216, TZ 53/13/033
30. Chvostová, E: Výsledky zkoušky tečení na parovodu ECHVA, VYZ TZ-53/14/016
31. Chvostová, E: Žáropevnost svarového spoje pro heterogenní kombinaci COST FB2 a COST F průběh zkoušek v r. 2015, VYZ-VZ-53/15/022
32. Chvostová, E: Výsledky creepových zkoušek části A i B projektu TAČRTA04021166. VYZ-VZ-53/15/073
33. Chvostová, E.: Výsledky zkoušek mechanických vlastností, metalografie a chemického rozboru tělesa skříně Seinajoki části B projektu TAČRTA04021166, VYZ-VZ-53/15/074
34. Chvostová, E, Novák M., Matějová, M.: Rozvoj metodiky stanovení mechanických vlastností pomocí malých vzorků, VZ-53/15/044
35. Chvostová, E: Staircase Fatigue, Sanborn a.s., TZ 53/15/026
36. Chvostová, E: Výsledky creepových zkoušek heterogenního svarového spoje CB2+P92, TZ 53/15/031
37. Chvostová, E, Volák, J.: VCÚ heterogenního svarového spoje COST F+16 236, TZ 53/15/043
38. Chvostová, E: Testování vzorků oceli ze stožáru vedení V410, TZ 53/15/076
39. Chvostová, E: Měření únavových vlastností na vzorcích s odlišným konečným zpracováním povrchu pro Sanborn a.s., TZ 53/15/084
40. Chvostová, E, Kanta, V.: Výsledky creepových zkoušek pro parovod R-RII. Označený E1061, VZ 53/15/55
41. Chvostová, E, Kanta, V.: Výsledky creepových zkoušek pro parovod R-RII. Označený E1059, VZ 53/15/53
42. Chvostová, E, Dlouhý, J.: Vyhodnocení provozuschopnosti VT těles zařízení ECHVA, výzkumná zpráva ZP1600801, 2016
43. Chvostová, E, Procházka, R.: Zkoušky VCÚ lopatkového materiálu T671 a materiálu T671 s návarem Stellite 6, výzkumná zpráva ZP160434, 2016

44. Chvostová, E., Konopík P.: Výzkum vlastností materiálů pro energetický průmysl – zkoušky tahem na oceli T671, vliv teploty na precipitaci Výzkumná zpráva ZP160435, 2016
45. Chvostová, E., Procházka R.: Výzkum a komplexní charakteristika oceli AK1TD, Výzkumná zpráva ZP160804, 2016
46. Chvostová, E., Procházka R., Konopík, P.: Zkoušky VCÚ tříbodovým ohybem na vzorcích ze základního materiálu a návaru Stellite, Výzkumná zpráva ZP160912, 2016

Zapojení v projektech:

Člen pracovní skupiny COST a Advance Creep

Evropský projekt COST 536: Vývoj 9 -12 % Cr ocelí pro velké výkovky (rotory) a odlitky (skříně, ventily) parních turbín. Projekt probíhal v letech 2004–2008 a byl pokračováním předchozích projektů COST 522 a COST 501.

Spoluřešitel projektu: TA04021166, název projektu: **Díly parních turbín se zvýšenou odolností proti působení creepu a únavového poškození** 1. 7. 2014 až 31. 12. 2017

Projekt FR-TI2/080 - Nové technologie spojování komponent průtočné části turbín pro ultra super kritické parametry páry (2010-2012, MPO/FR)

1.1.2010 - 31.12.2012

RIV/47718684: _____/13:#0000553 - Evaluation of mechanical properties and microstructure of dissimilar weld joint of COST F and FB2 steels after long term creep test (2013), Kasl, J.

,Jandová, D. Chvostová, E., Folková, E. - Článek ve sborníku

Výzkumný záměr MSM4771868401 - Výzkum provozní degradace perspektivních konstrukčních materiálů (2004-2010, MSM)

1. 1. 2004 - 31. 12. 2010

RIV/47718684:- **Different Types of Crackings of P91 Steel Weld Joints after Long-term Creep Tests** (2010), Kasl, J. Jandová, D., Chvostová, E., - Článek ve sborníku

RIV/47718684:- **Causes of Failure of Weld Joint During Long Time Creep Testing** (2010),

Kasl, J. Jandová, D., Chvostová, E., - Článek ve sborníku, RIV/47718684: - **Creep properties**

and microstructure evolution of weld joint of the pipe made of P92 steel (2010), Kasl, J.,

Jandová, D., Chvostová, E., Folková, E. - Článek ve sborníku RIV/47718684: **Creep Resistance**

of Weld Joint of Tube Made of P92 Steel (2010) Kasl, J., Jandová, D., Chvostová, E.,

Martínek, P. - Článek ve sborníku, RIV/47718684: **Microstructure analysis of E911 steel after**

more than 100,000 hours of creep exposure (2010) Kasl, J., Jandová, D., Chvostová, E., -

Článek ve sborníku, RIV/47718684: - **Microstructure Development during Creep Testing of**

P92 Steel Weld Joint (2010) Kasl, J., Jandová, D. Chvostová, E., J - Článek v odborném

periodiku: Acta Metallurgica Slovaca Conference

Pedagogická činnost:

Výuka ve svařečské škole ŠKOLA WELDING s. r. o., Destruktivní zkoušení materiálů a svarových spojů