

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

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

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

**Hodnocení mechanických vlastností
pomocí miniaturních zkušebních
těles typu „Small Punch“ a včasná
lokalizace provozních defektů
pomocí akustické emise**

Autor: **Ing. Josef Volák**

Školitel: **Prof. Ing. Václav Mentl, CSc.**

Školitel specialista: **doc. Ing. Jan Džugan, Ph.D.**

Akademický rok 2014/2015

Poděkování:

Touto cestou bych chtěl poděkovat svému školiteli Prof. Ing. Václavu Mentlovi, CSc. za profesionální vedení předkládané práce, školiteli specialistovi doc. Ing. Janu Džuganovi, Ph.D. za věcné připomínky a technické vedení práce a Ing. Václavu Koulovi, CSc., zejména za vedení v oblasti akustické emise. Dále bych rád poděkoval společnosti VZÚ Plzeň, kde bylo možné veškeré experimenty realizovat a společnosti Dakel, bez které by nebylo možné realizovat experimenty v oblasti akustické emise. Poděkování patří také následujícím dotačním programům:

MPO č. FT-TA2-019- Výzkum a vývoj nových diagnostických systémů pro hodnocení životnosti turbin,

Výzkumný záměr MSM 4771868401 „Výzkum provozní degradace perspektivních konstrukčních materiálů,

Program MPO - FR-TI2/447 Provozní analyzátor únavového poškození strojních dílů využívající akustickou emisi,

Program MPO - FR-TI4/602 - Diagnostický komplex pro detekci úniků tlakových médií a materiálových vad tlakových komponent jaderných a tepelných elektráren,

TE01020068 Centrum výzkumu a experimentálního vývoje spolehlivé energetiky a

ED2.1.00/03.0077 - Západočeské materiálově metalurgické centrum (2011-2014, MSM/ED), bez kterých by bylo naprosto nereálné tuto disertační práci dokončit

SGS-2013-028 Podpora studentské vědecké činnosti v oblasti materiálového inženýrství

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

Anotace

Tato disertační práce pojednává o metodě Small Punch test (**SP** test) a o akustické emisi (**AE**). Metoda **SP** test patří mezi tzv. semi-destruktivní metody a spočívá v šetrném odebrání minimálního množství materiálu bez dalších nutných. Z odebraného materiálu se následně vyhodnocují mechanické vlastnosti materiálu a degradace. Pomocí metody **AE** lze lokalizovat degradovaná místa provozovaných komponent a následně odběrem **SP** testů v lokalizovaných oblastech určit míru degradace provozovaného zařízení. Obě tyto metody mají nesmírný význam pro bezpečný dlouhodobý provoz celospolečensky důležitých komponent a včasnou predikci poškozených dílů, jako jsou např. energetická zařízení, zařízení v petrochemii, přenosové soustavy pro distribuci tepla, plynu, mostní konstrukce, atd.

V rešeršní části práce jsou detailně představeny obě metody. Praktická část práce se zabývá výrobou zkušebních těles pro **SP** testy a stanovováním empirických korelačních vztahů mezi standardními tělesy a tělesy pro **SP** testy. V oblasti **AE** je řešeno především monitorování vzniku trhlin při únavovém poškození, neboť včasná detekce počínajícího růstu trhlin např. na tlakových nádobách jaderných elektráren, potrubí, atp. je nezbytná.

Klíčová slova: Small Punch test, akustická emise, Small Fatigue Test, korelace

Annotation

This dissertation thesis describes Small Punch test method (**SP** test) as well as acoustic emission (**AE**). **SP** test method belongs to the group of so called semi-destructive methods which involves careful removal of minimal amount of testing material without the need of additional repairs. Mechanical properties as well as degradation are subsequently evaluated from the removed material. By means of the **AE** method it is possible to locate degraded parts of the components in operation and subsequently after the **SP** test sampling in the localized areas it is possible to determine the degree of degradation of the device in operation. Both of these methods are of enormous importance for safe long-term operation of important components and timely prediction of damaged parts such as power plant equipment, petrochemical equipment, transmission systems for distribution of heat and gas, bridge constructions etc.

Both methods are described in detail in the theoretical part of this dissertation thesis. Practical part is focused on production of test specimens for **SP** tests as well as determination of empirical correlations between standard specimens and specimens for **SP** tests. **AE** part of the

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

thesis is concentrated on monitoring of formation of cracks under fatigue damage because early detection of incipient crack is vital (e.g. cracks in pressure vessels of nuclear power plants, pipelines, etc.).

Key words: Small Punch test, acoustic emission, Small Fatigue Test, correlation

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

Obsah

Seznam použitých zkratk a veličin	8
1. Úvod	11
2. Zkouška tahem.....	13
3. Creep – tečení materiálu	19
3.1. Rozdělení tečení	19
3.2. Křivka tečení	21
3.3. Dlouhodobá pevnost materiálu.....	23
3.4. Změny ve struktuře při tečení.....	23
3.5. Zkoušky tečení	27
3.6. Časová extrapolace výsledků zkoušek tečení.....	28
4. Únava materiálu	30
4.1. Klasifikování cyklického namáhání	31
4.1.1. Stádium změn mechanických vlastností, cyklické zpevnění a změkčení.....	33
4.1.2. Stádium vzniku únavových trhlin.....	35
4.1.3. Šíření únavových trhlin.....	39
4.2. Hodnocení odolnosti materiálu proti únavovému porušení	41
5. Metoda Small Punch test	44
5.1. Obecná charakteristika	44
5.2. Zkoušky na malých vzorcích.....	45
5.3. Odběr vzorků.....	48
5.4. Důležitost výsledků SP testu: korelace s výsledky jednoosých zkoušek	52
5.5. Hodnocení aktuálních křehkolomových vlastností energetických zařízení pomocí penetračních testů	54
5.6. Stanovení únavových charakteristik.....	58
5.7. SP test na úrovni mezinárodní spolupráce	60
5.8. SP test na úrovni ČR	61
6. Metoda akustické emise	62

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

6.1.	Akustická emise – fyzikální jev a měřicí metoda.....	62
6.1.1.	Časová a frekvenční reprezentace AE. Frekvenční pásmo měření AE.....	66
6.2.	Základní typy zdrojů AE a jejich charakteristiky.....	68
6.2.1.	Pen Test – základní kalibrační zdroj – „pevný bod AE“.....	68
6.2.2.	Jednorázový poskok defektu v materiálu – „energie prasknutí“.....	68
6.2.3.	Faktory ovlivňující detekovatelnost AE při porušování materiálu.....	68
6.2.4.	Základní mechanismy AE při deformaci a porušování materiálu.....	69
6.2.5.	Další faktory a zdroje AE doprovázející deformaci a porušení materiálů.....	70
7.	Experimentální část.....	71
7.1.	Small Punch test.....	71
7.1.1.	Příprava vzorků pro SP test-penetrační testy.....	71
7.1.2.	Provedení zkoušky SP test.....	74
7.1.3.	Experimentální výsledky zkoušek Small Punch.....	76
7.1.4.	Korelace mezi zkouškou tahem a SP testem.....	84
7.1.5.	Resumé.....	87
7.1.6.	Příprava vzorků pomocí pily s mikrometrickým posuvem.....	87
7.1.7.	Porovnání odlišné výroby vzorků.....	93
7.1.8.	Porovnávací testy VZÚ Plzeň x MMV Ostrava.....	95
7.1.9.	Vliv imperfekcí instrumentace na výsledky SP testu.....	96
7.1.10.	Zhodnocení.....	102
7.2.	SP creep.....	103
7.2.1.	Provedení SP creepu.....	103
7.2.2.	Experimentální výsledky Small Punch za creepových teplot.....	105
7.2.3.	Porovnání SP testu za creepových teplot s výsledky tradičních creepových testů.....	106
7.2.4.	Resumé.....	109
7.3.	Small Fatigue Test.....	110
7.3.1.	Příprava vzorků pro zkoušky únavy, které lze vyrobit z odběrů SP.....	110
7.3.2.	Výroba vzorků SFT.....	112
7.3.3.	Testovaný materiál P92.....	113
7.3.4.	Provedení zkoušek únavy.....	114
7.3.5.	Postup zkoušení.....	116
7.3.6.	Výsledky zkoušek.....	116
7.3.7.	Diskuse výsledků.....	117
7.3.8.	Zhodnocení únavových testů materiálu P92.....	118

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

7.3.9. Testovaný materiál 15CH2NMFA	125
7.3.10. Zhodnocení	127
7.4. Sledování růstu únavových trhlin pomocí akustické emise a elektrického potenciálu	128
7.4.1. Zkušební aparatura pro měření AE a elektrického potenciálu.....	128
7.4.2. Snímače akustické emise.....	128
7.4.3. Zkušební stroj	129
7.4.4. Zkoušený materiál.....	129
7.4.5. Návrh zkušebního vzorku - materiál P92.....	129
7.4.6. Diagnostika vzniku trhliny potenciálovou metodou a AE.....	133
8. Diskuze výsledků	151
8.1. Metoda Small Punch test - TAH	151
8.2. Metoda Small Punch test – CREEP	152
8.3. Metoda Small Punch test - SMALL FATIGUE TEST	153
8.4. Metoda akustické emise	153
9. Závěr	155
10. Seznam použité literatury	157
11. Přílohy.....	162
Příloha 1 – Seznam použitých obrázků	162
Příloha 2 – Seznam použitých tabulek	166
Příloha 3 – Seznam publikací.....	167
Příloha 4 – Seznam funkčních vzorů.....	171

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

Seznam použitých zkratk a veličin

označení název jednotka

Zkouška tahem

A	<i>tažnost</i>	[%]
E	<i>Youngův modul pružnosti v tahu</i>	[MPa]
F_m	<i>největší zatěžující síla</i>	[N]
d_0	<i>průměr zkušební tyče</i>	[mm]
l	<i>délka tyče zjištěná po přetržení</i>	[mm]
l_0	<i>původní délka tyče</i>	[mm]
R_m	<i>mez pevnosti v tahu</i>	[MPa]
R_e	<i>mez v kluzu</i>	[MPa]
S_0	<i>průřez tyče po přetržení</i>	[mm ²]
S_0	<i>původní průřez tyče</i>	[mm ²]
Z	<i>kontrakce (zúžení průřezu)</i>	[%]
ε	<i>poměrné prodloužení</i>	[-]
σ_U	<i>mez úměrnosti</i>	[MPa]
σ_E	<i>mez pružnosti</i>	[MPa]
$\sigma_{Et 0.005}$	<i>smluvní hodnota pro trvalou deformaci zkušební tyče 0.005 % původní měřené délky l_0</i>	[MPa]
$\sigma_{0.2}$	<i>napětí, které způsobí trvalé prodloužení 0.2%</i>	[MPa]
τ	<i>napětí tečné</i>	[MPa]
σ	<i>napětí normálové</i>	[MPa]

Small Punch test

D	<i>průměr otvoru, který je rovný $2R$ (obvykle 4 mm)</i>	[mm]
d	<i>poloměr vzorku v místě trhliny</i>	[mm]
d_f	<i>průhyb vzorku při náhlém porušení</i>	[mm]
d_m	<i>průhyb vzorku při maximální síle</i>	[mm]
F_{max}	<i>maximální síla při SP testu</i>	[N]
h	<i>tloušťka vzorku v místě trhliny</i>	[mm]

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

h_0	počáteční tloušťka vzorku ($0,500 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$)	[mm]
K	blokující koeficient ($0,5$ pro vzorek neupevněný na okraji, $0,6-0,8$ pro upevněný vzorek)	[-]
k_{sp}	mnou navržený koeficient při pevném uložení ($1,385$)	[-]
R	poloměr otvoru v disku ($+0,2 \text{ mm}$ při pevném uložení)	[mm]
R_{msp}	mez pevnosti při SP testu	[MPa]
r	poloměr vlačovací kuličky ($1,25 \text{ mm}$)	[mm]
t	čas	[s]
t_f	nejmenší tloušťka tělesa v místě trhliny	[mm]
u_1	posunutí razidla ($\varphi = 0$)	[mm]
θ	úhel φ , kde $d = R$	[°]
θ_0	úhel φ v místě trhliny ($\theta_0 = \varphi_{max}$)	[°]
φ	úhel mezi povrchovou normálou a vertikální osou	[°]
χ	koeficient tření ($0,6 - 0,8$ v závislosti na teplotě a zátěži)	[-]
σ (R_{msp})	maximální napětí při SP test	[MPa]
K_{IC}	lomová houževnatost	[MPa.m ^{0.5}]
J_{IC}	lomová houževnatost určená z J-integrálu	[kJ/m]
ϵ_f	ekvivalentní lomová deformace	[-]
K, J	konstanty	[N/mm]

Creep test

A ($t/T/R$)	trvalé poměrné prodloužení po čase t , při teplotě T a napětí R	
A_r	tažnost při creepu	[%]
E_T	modul pružnosti materiálu při dané teplotě	[MPa]
R_{mT} (t/T)	mez pevnosti při tečení	[MPa]
R_T ($t/A/T$)	mez tečení	[MPa]
T	zkušební teplota	[K]
T_m	zkušební teplota tavení	[K]
t_r	doba do lomu zkušební tyče při creepu	[s]
Z_r	kontrakce při creepu	[%]
ϵ_0	prodloužení při creepu	[-]
σ	napětí při creep testu	[MPa]
τ_z	zbytková životnost	[h]

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

P	<i>Larson-Millerův parametr</i>	[-]
C	<i>materiálová konstanta</i>	[-]

Únava

σ_{max}	<i>maximální hodnota napětí</i>	[MPa]
σ_{min}	<i>minimální hodnotou napětí</i>	[MPa]
σ_m	<i>střední napětí cyklu</i>	[MPa]
σ_a	<i>amplituda napětí</i>	[MPa]
$\Delta\sigma$	<i>rozkmit napětí</i>	[MPa]
R	<i>součinitel asymetrie cyklu</i>	[-]
N_f	<i>počet cyklů do porušení</i>	[-]
σ_c	<i>mez únavy</i>	[MPa]
ε_{pl}	<i>plastická deformace</i>	[-]
SFT	<i>small fatigue test</i>	[-]

Akustická emise

ES	<i>práh začátku události</i>	[mV]
EE	<i>prah konce události</i>	[mV]
Td	<i>mrtvá doba</i>	[μ s]
Count1	<i>prahová úroveň</i>	[-]
Count2	<i>prahová úroveň</i>	[-]
CRP	<i>kumulace hitů v rostoucí fázi zatěžovacího cyklu</i>	[-]
CFP	<i>kumulace hitů v klesající fázi zatěžovacího cyklu</i>	[-]
CMA	<i>kumulace hitů v maximální fázi zatěžovacího cyklu</i>	[-]
CMi	<i>kumulace hitů v minimální fázi zatěžovacího cyklu</i>	[-]
t_s	<i>čas začátku události</i>	[μ s]
t_e	<i>čas konce události</i>	[μ s]

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

1. Úvod

V současné době se neustále zvyšují požadavky na bezpečný dlouhodobý provoz celospolečensky důležitých komponent, jako jsou např. energetická zařízení, zařízení v petrochemii, přenosové soustavy pro distribuci tepla, plynu, nebo např. mostní konstrukce. U těchto typů komponent je nutné zajistit jejich co nejdelším provozem zvýšení ekonomické návratnosti investic, při minimalizaci nebezpečí náhlého katastrofického porušení. Za tímto účelem je vyvíjena a realizována celá řada metod pro detekci případných poruch v materiálu a monitorování jejich velikosti. Současně s monitorováním poruch je nezbytné provádět vyhodnocování aktuálního stavu materiálu, který v důsledku provozního namáhání mění své mechanické vlastnosti a převážně dochází u provozovaných materiálů k degradaci jejich vlastností a tím ke zvýšené náchylnosti ke křehkému porušení. Pro vyhodnocení aktuálních mechanických vlastností jsou vyvíjeny speciální nedestruktivní či semi-destruktivní metodiky.

Základními materiálovými parametry používanými pro návrh a následný provoz konstrukcí jsou tahové charakteristiky, přechodová teplota ze zkoušek vrubové houževnatosti a únavové a creepové charakteristiky. Tato práce se zabývá využitím semi-destruktivních metod pro vyhodnocení uvedených materiálových vlastností s využitím miniaturních zkušebních těles, převážně na základě penetračních zkoušek. Tyto zkoušky jdou dále doplněny měřeními akustické emise umožňující získat bližší informace o rozvoji poškození v materiálu.

Práce se skládá z části teoretické, kde jsou vysvětleny základy vyhodnocování sledovaných veličin a části experimentální, kde jsou odvozovány vztahy mezi výsledky měřeními na standardních a miniaturních zkušebních vzorcích. Teoretická část se zabývá popisem standardních zkoušek tahem, měření únavových vlastností, popisem creepového chování a popisem zkoušek na miniaturních tělesech. V případě zkoušek miniaturních těles je také věnována pozornost možnostem odběru experimentálního materiálu, jako klíčové části semidestruktivních zkoušek reálných komponent. Dále je v teoretické části zmíněno použití akustické emise pro vyhodnocování degradace materiálů, jako doplňková metoda ke zkouškám miniaturních zkušebních těles.

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

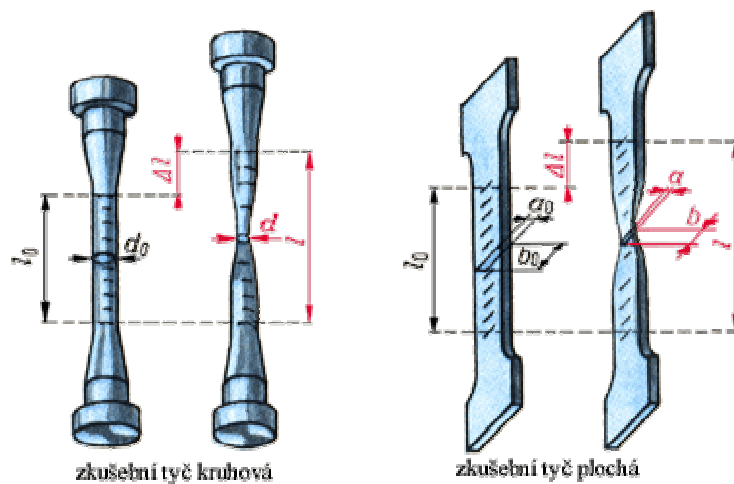
Cílem praktické části disertační práce je porovnání výsledků mezi standardními zkušebními tělesy a tělesy miniaturními pro vyhodnocení tahových vlastností a únavových a creepových charakteristik pro širokou škálu materiálů. Velký důraz je kladen na přípravu experimentálních těles, vzhledem k jejich malým rozměrům a potenciálnímu ovlivnění materiálových charakteristik jejich nevhodnou přípravou. Pro jednotlivé typy zkoušek jsou v relevantních případech odvozeny a ověřeny korelační vztahy pro přepočet mezi miniaturními a standardními tělesy.

Další nedílnou součástí práce je provedení mechanických zkoušek měřených akustickou emisí na vybraných typech materiálů. Monitorování vzniku trhlin akustickou emisí má nesmírný význam, neboť včasná detekce počínajícího růstu trhlin např. na tlakových nádobách jaderných elektráren, potrubí, atp. je nezbytná. Metodou akustické emise lze lokalizovat poškozená místa celého systému a následně odběrem materiálu pomocí metody SP test bez nutnosti zdlouhavých odstávek určit lokální míru degradace materiálu.

Tato práce shrnuje výsledky získané v rámci dlouhodobé aktivity autora v oblasti miniaturních zkušebních těles. Autor se touto problematikou zabývá již od své bakalářské práce v roce 2006, kdy na tuto práci navázal diplomovou prací a následně předkládanou prací disertační.

2. Zkouška tahem

Zkouška tahem dle ČSN EN ISO 6892-1 [1], dříve ČSN EN 10002 -1 [2] je nejrozšířenější statickou zkouškou. Je nutná téměř u všech technických materiálů, protože umožňuje získání základních materiálových charakteristik potřebných pro výpočet konstrukčních prvků a volbu vhodného materiálu. Zkoušky tahem se zpravidla nedělají přímo na vyrobené součásti, ale na zkušebních tyčích, jejichž tvary a rozměry jsou normalizovány, příklady jsou zobrazeny na **obr. 1**. Vlastní měřená délka l_0 závisí na průřezu zkušební tyče a při kruhovém průřezu je u dlouhé tyče $10 d_0$ a u tyče krátké $5 d_0$ (d_0 =průměr zkušební tyče). Pro ploché vzorky se l_0 stanovuje ze vztahů $l_0=11,3\sqrt{S_0}$ pro tyče dlouhé, resp. $l_0=5,65\sqrt{S_0}$ pro tyče krátké.



Obr. 1 Tvary zkušebních tyčí pro zkoušku tahem [3]

Tahovou zkouškou zjišťujeme mez kluzu, pevnost v tahu, poměrné prodloužení, tažnost a zúžení (kontrakci) zkoušeného materiálu, popř. E-modul.

Při všech statických zkouškách vzniká v zatížené součásti napětí. Je to míra vnitřních sil, které vznikají v materiálu působením sil vnějších. Rozeznáváme napětí normálové σ a napětí tečné τ . Podíl síly a skutečné plochy průřezu v kterémkoli stadiu zkoušky nazýváme skutečným napětím. Běžně však používáme hodnoty smluvních napětí, protože neuvažujeme změnu průřezu tyče a zatížení vztahujeme na původní průřez S_0 .

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

Pevnost v tahu (mez pevnosti v tahu) R_m je smluvní hodnota napětí daného podílem největší zatěžující síly F_m v průběhu zkoušky a původního průřezu tyče S_0 :

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (1)$$

Byla-li původní délka zkušební tyče l_0 a délka zjištěná po přetržení l , je celkové prodloužení (změna délky):

$$\Delta l = l - l_0 \quad (2)$$

Poměrné prodloužení ε je dáno poměrem změny délky Δl k původní délce zkušební tyče l_0 :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (3)$$

Tažnost A je poměrné prodloužení vyjádřené v procentech původní délky:

$$A = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100[\%] \quad (4)$$

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

Kontrakce Z je dána poměrem zúžení průřezu tyče po přetržení ($S_0 - S$) k původnímu průřezu tyče S_0 . Vyjadřujeme ji v procentech:

$$Z = \frac{S_0 - S}{S_0} \cdot 100[\%] \quad (5)$$

Mez kluzu R_e je napětí, při němž se zkušební tyč začíná výrazně prodlužovat, aniž by stoupala zatěžující síla, nebo při němž nastává prodlužování doprovázené poklesem zatěžující síly. Stanovíme ji ze vztahu

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

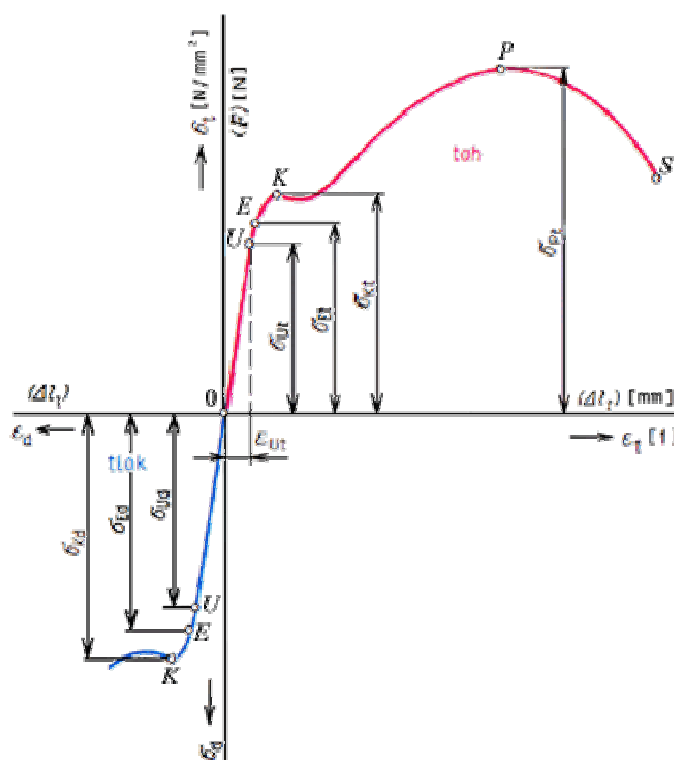
$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad (6)$$

Hodnoty R_m a R_e jsou uváděny v MPa, tažnost a kontrakce v procentech.

U uhlíkových ocelí (žíhaných) bývá poměr

$$\frac{R_e}{R_m} = 0.5 \text{ až } 0.6, \text{ u slitinových ocelí až } 0.9. \quad (7)$$

Pracovní diagram **obr. 2**), udává závislost poměrného prodloužení ε na napětí σ (nebo změny délky Δl na zatěžující síle F). Z diagramu vidíme, že zpočátku je prodloužení tyče přímo úměrné vzrůstajícímu zatížení, a to až do bodu U .



Obr. 2 Pracovní diagram zkoušky tahem a tlakem u měkké uhlíkové oceli [3]

Napětí σ_U , odpovídající bodu U , nazýváme **mez úměrnosti** a definujeme ji jako mezní napětí, při němž je prodloužení ještě přímo úměrné napětí a do kterého platí Hookův zákon.

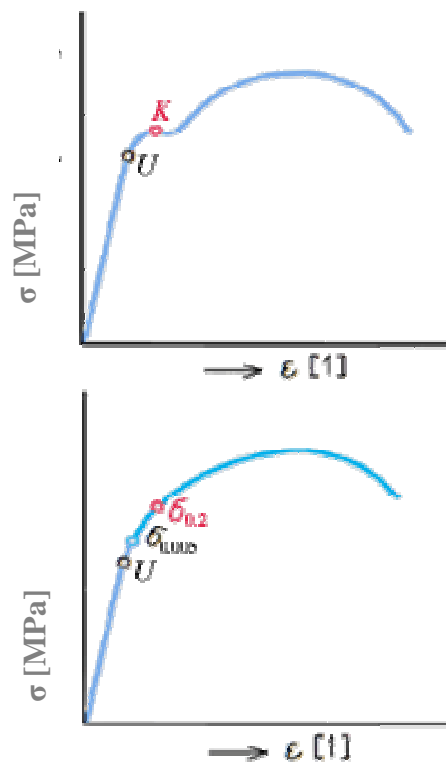
Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

V dalším průběhu zkoušky přestává být prodloužení přímo úměrné zatížení. Až po bod E je protažení pružné, tj. po odlehčení nabývá tyč původních rozměrů. Napětí σ_E odpovídající bodu E je **mez pružnosti** a definujeme ji jako mezní napětí, které po odtížení (úplném odlehčení) nevyvolává trvalé deformace.

Zvětšujeme-li zatížení dále, nastává přetváření plastické (trvalé) a tyč po odlehčení již nenabude původní délky. Napětí σ_{Kt} odpovídající bodu K označujeme jako **mez kluzu v tahu** a definujeme je jako nejmenší napětí, při němž nastávají podstatné výrazné deformace, které někdy dočasně pokračují, aniž se zároveň zvyšuje napětí.

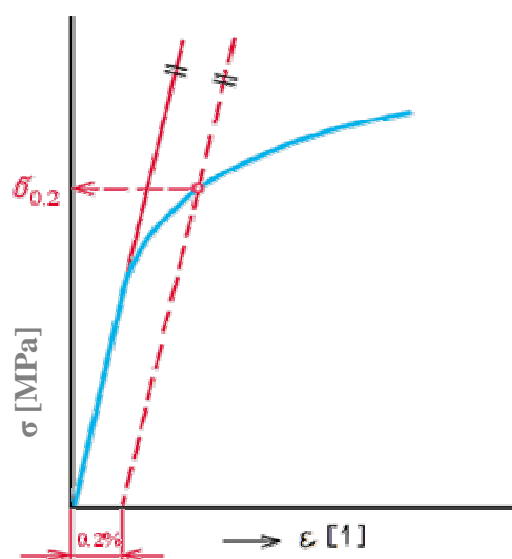
V technické praxi se za mez pružnosti bere napětí způsobující první trvalou deformaci. Je to smluvní hodnota pro trvalou deformaci zkušební tyče 0.005 % původní měřené délky l_0 . Označujeme ji $\sigma_{Et 0.005}$, krátce $\sigma_{0.005}$. Zjišťování této meze je velmi obtížné a zdlouhavé.

U některých materiálů prodleva nenastane a mez kluzu nelze zjistit (**obr. 3**). Proto u těchto materiálů bereme jako napětí na mezi kluzu smluvní hodnotu napětí, které způsobí trvalé prodloužení 0.2%, tj. $\sigma_{0.2}$. Zjišťujeme je buď graficky (**obr. 4**), nebo měřicím zařízením (průtahoměry).



Obr. 3 Pracovní diagram oceli s výraznou mezí kluzu a oceli bez výrazné meze kluzu [3]

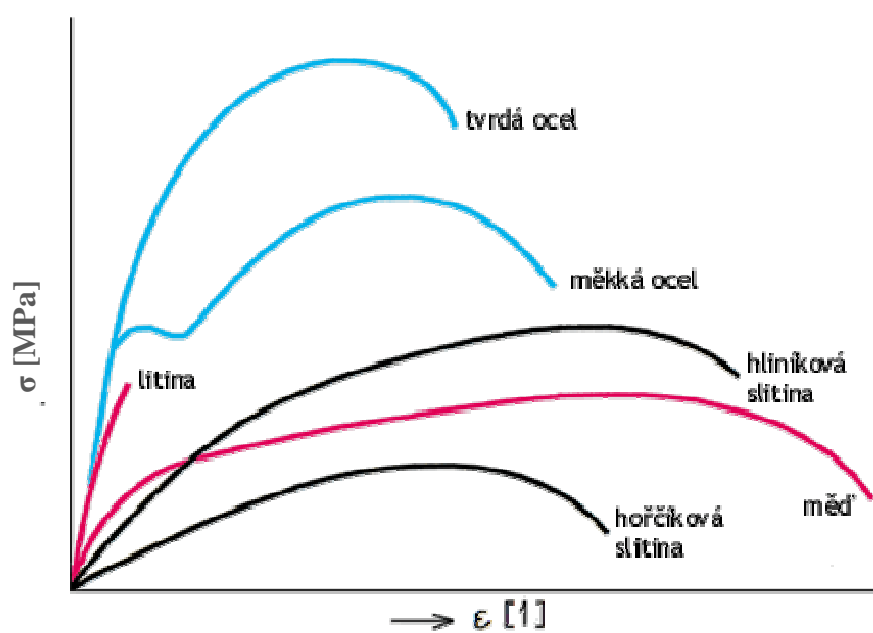
Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise



Obr. 4 Grafické stanovení $\sigma_{0,2}$ pracovního diagramu [3]

Od bodu **K** jde křivka diagramu téměř vodorovně, tyč se prodlužuje, aniž vzrůstá zatížení. Někdy se objeví i malý pokles napětí. Při dalším zvětšování zatížení se tyč prodlužuje mnohem rychleji, než vzrůstá zatížení. Bodu **P** na vrcholu křivky odpovídá největší napětí **R_m** (**mez pevnosti v tahu čili pevnost v tahu**). Při napětí odpovídajícím bodu **S** se zkušební vzorek přetrhne. Tvar pracovního diagramu se mění podle druhu materiálu. Na **obr. 5** jsou uvedeny příklady pracovních diagramů pro některé konstrukční materiály [3].

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise



Obr. 5 Příklad pracovních diagramů různých kovů a slitin [3]

3. Creep – tečení materiálu

Pevnostní vlastnosti tradičních konstrukčních materiálů např. ocele jsou při normální teplotě nezávislé na čase. Při zvýšené teplotě se bude materiál deformovat, bude téci, i když působící napětí bude nižší než mez kluzu tohoto materiálu. Bude docházet k tečení (creepu).

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 homologovanou 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).

Definice tečení

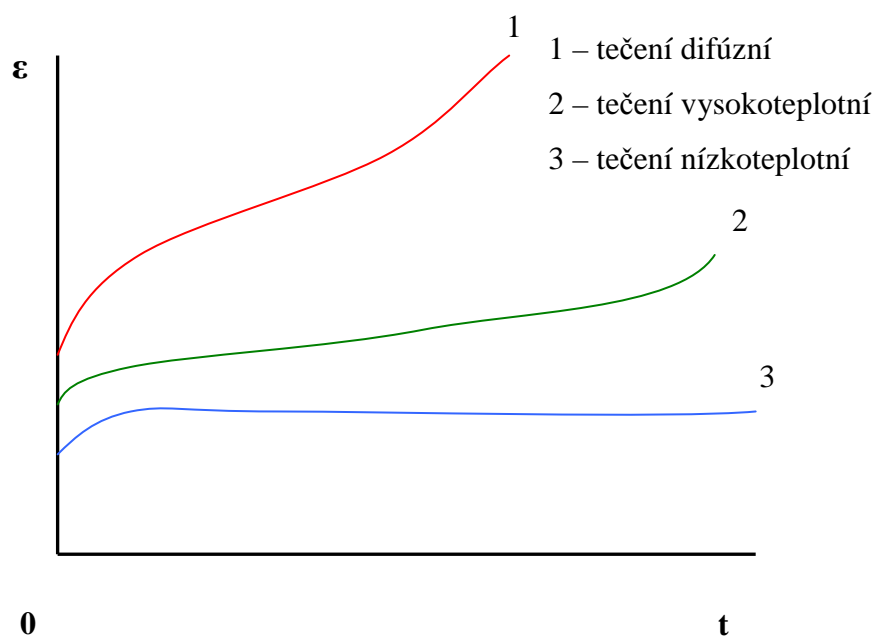
Tečení materiálu (creep) je možno definovat jako nárůst plastické deformace s časem působením konstantního zatížení (konstantního napětí nebo konstantní síly) pod úrovní meze kluzu, za zvýšených teplot, který může vést k lomu součásti po určité době, která závisí na velikosti působícího zatížení a teploty. Obecně platí, že rychlost tečení se zvyšuje a čas do lomu se zkracuje s vyšší teplotou a větším zatížením [4].

3.1. Rozdělení tečení

Základním faktorem, který ovlivňuje tečení a rozhoduje o mechanismu deformace při tečení, je teplota. Podle teploty, při které tečení probíhá, se tečení rozděluje na:

- a) Nízkoteplotní – homologická teplota je nižší než 0,3.
- b) Vysokoteplotní – homologická teplota je v rozsahu 0,3 - 0,9. Toto tečení má pro technickou praxi největší význam. Např. lopatky parních turbín a parovody pracují v oblasti homologických teplot 0,4 – 0,5.
- c) difúzní – homologická teplota je vyšší než 0,9.

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise



Obr. 6 Křivka tečení [5]

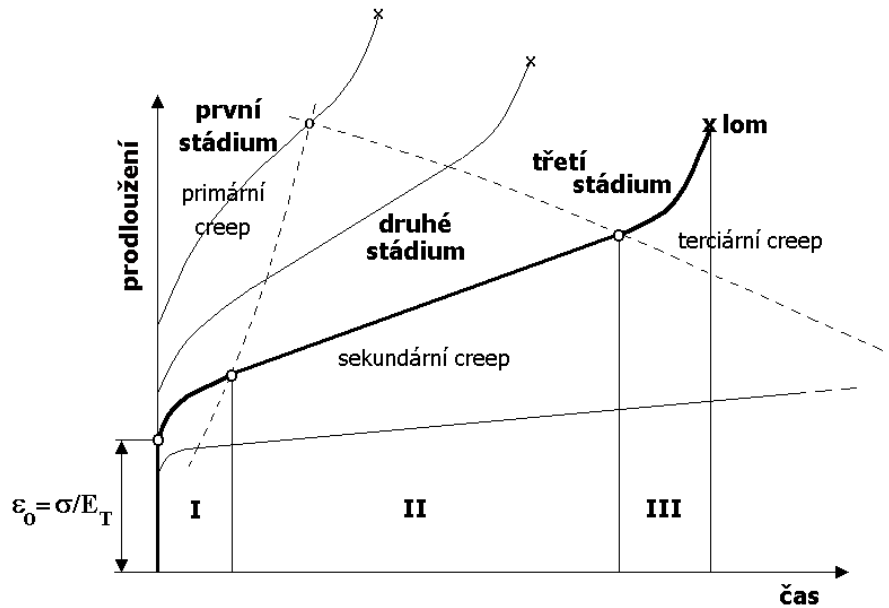
Tvar křivek tečení závisí na daném materiálu a jeho vlastnostech (chemické složení, doba použití, vliv prostředí, atd.) zkušební teplotě a velikosti působícího napětí (**obr. 6**).

Poznámka: Homologovaná teplota je definována jako poměr provozní, event. zkušební teploty T k teplotě tavení daného kovu nebo slitiny T_m (T / T_m). Pro stejnou homologovanou teplotu (shodný poměr T / T_m) můžeme získat podobné křivky tečení pro různé materiály. (V případě ocelí dochází k tečení při teplotách T / T_m vyšších než 0,5) [5].

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

3.2. Křivka tečení

Nárůst deformace (prodloužení tyče) s časem vyjadřuje křivka tečení, která má čtyři oblasti (obr. 7).



Obr. 7 Křivky tečení [4]

- 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 $d\epsilon/dt$ zůstává konstantní a závislost deformace na čase je tak lineární. Délka

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

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

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = A \cdot \sigma^n \quad (8)$$

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 difuzní creep, probíhající difuzí vakancí na hranice zrn a tvorbou kavit, což vede v důsledku k jejich oslabení a následnému interkrytalickému porušení,

- Konečnou fázi předcházející lomu součástí 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 interkrytalický 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. (Transkrytalický lom při creepu nastává zejména při vysokých hodnotách zatížení a pro praktické případy je netypický.)

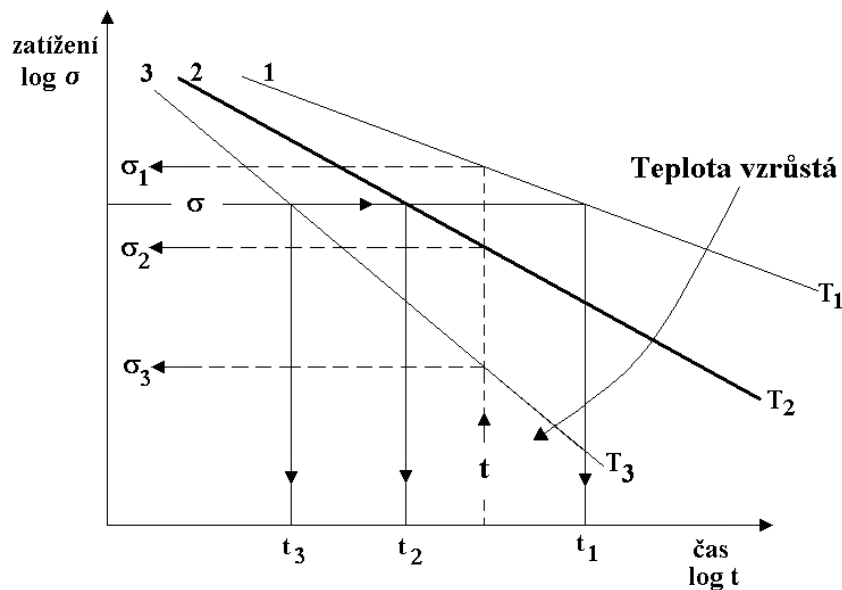
Nejdůležitějším parametrem z hlediska praxe je rychlost ustáleného tečení, sekundárního creepu, $d\varepsilon/dt$. Jedná se o veličinu, která je rozhodující při dimenzování konstrukcí pro dlouhodobé aplikace v situacích, kdy creep se stává dominantním poškozujícím mechanismem. V takových případech je limitním faktorem zvětšující se plastická deformace,

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

kteřá nesmí překročit za celou dobu provozu součásti přípustnou hodnotu danou konstrukcí zařízení [4].

3.3. 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. 8*).



Obr. 8 Závislost působícího zatížení a doby do lomu součásti při různých teplotách [4]

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.

3.4. Změny ve struktuře při tečení

Tečení je doprovázeno těmito strukturními změnami:

- krystalografický skluz, pohyb dislokací v kluzových rovinách,
- tvorba substruktury, pohyb dislokací mimo kluzové roviny,
- tečení po hranicích zrn (pokluzu),

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

- difúze vakancí a intersticiálních atomů.

Rychlost tečení je zásadně řízena pohybem dislokací. Kromě teploty a napětí ovlivňuje vysokoteplotní tečení struktura materiálu (příspěvek 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 zásadě 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 uváznuté 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, skluzu 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.

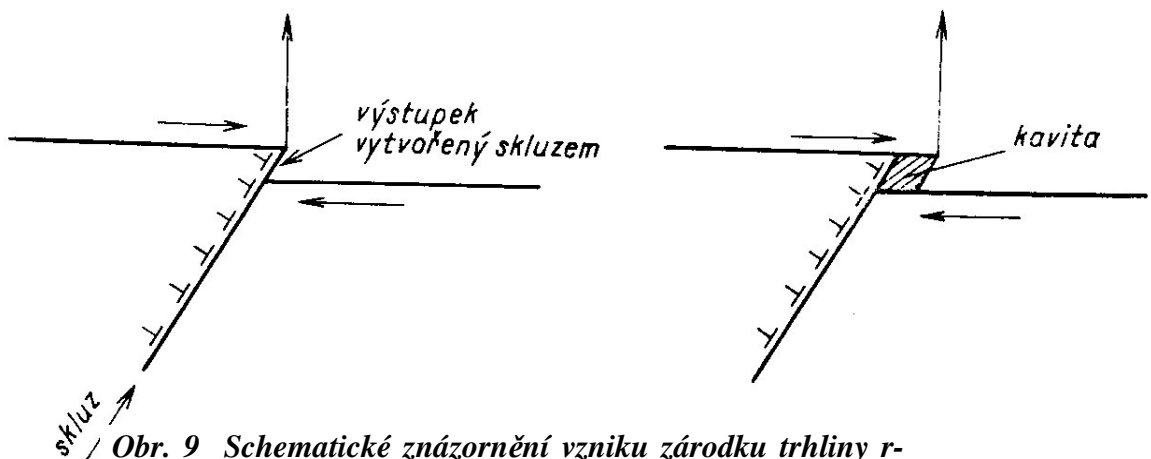
Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

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 [6].

Mechanismus nukleace trhlin

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

Dutiny/kavity eliptického nebo kruhového tvaru r-typu (*obr. 9*), 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 magistrální 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 magistrální 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 součásti za daných podmínek dostatečně tvárný, nebo rychlým křehkým lomem pokud je materiál v křehkém stavu.

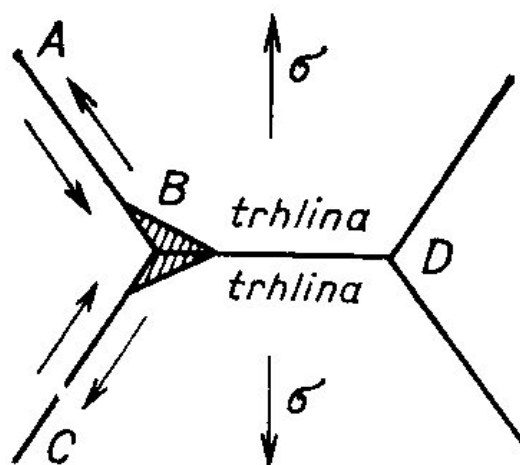


Obr. 9 Schematické znázornění vzniku zárodku trhliny r-typu pokluzem po hranicích zrn [6]

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

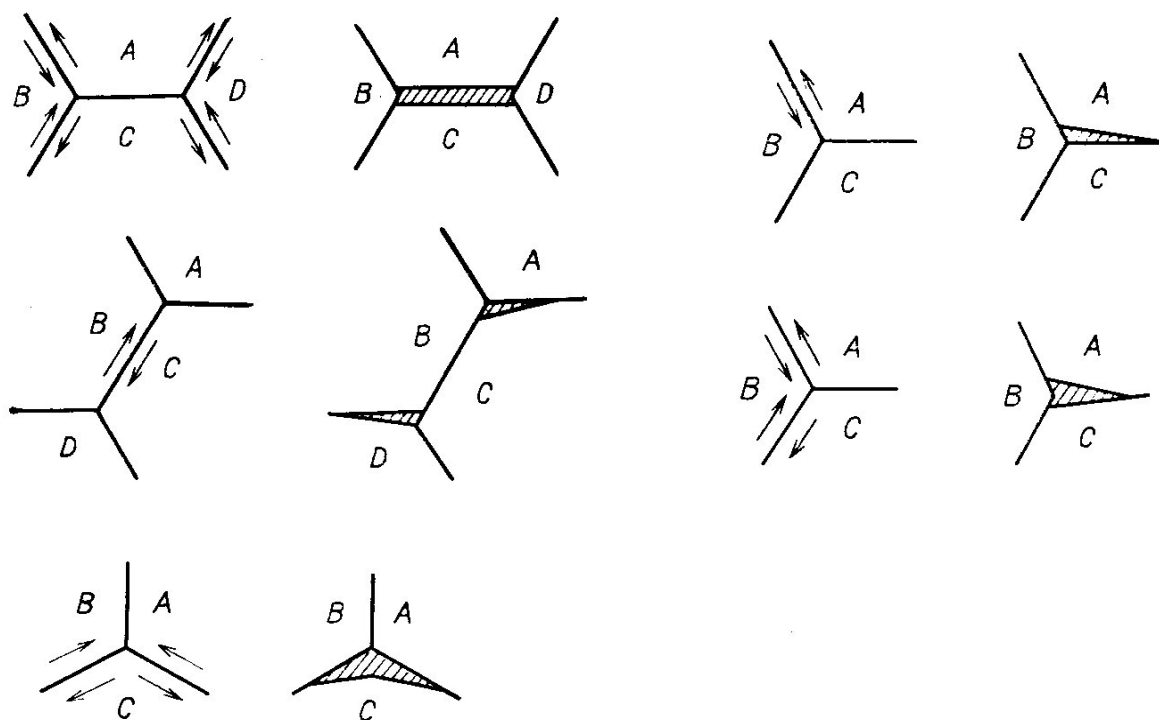
b) trhliny klínového tvaru v místech styku tří zrn - trhliny w-typu (**obr. 10**)

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. 10. 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. 11**). 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 precipitátů na hranicích zrn, který značnou měrou omezuje jejich migraci.



Obr. 10 Model vzniku trhlin w -typu [6]

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise



Obr. 11 Různé obměny jednoduchého mechanismu vzniku trhlin w – typu [6]

3.5. Zkoušky tečení

Podstatou zkoušek tečení je ohřev zkušební tyče na předepsanou teplotu a její zatížení tahovou silou ve směru podélné osy tyče. Pro zkoušky tečení za vyšších teplot platí tyto normy ČSN EN 10 291 z 6/2001, DIN 50 118 a ASTM E 139. Zkoušky se provádějí se na speciálních zkušebních strojích tzv. standech.

Mez pevnosti při tečení a mez tečení

Při zkouškách tečení se zjišťuje:

1. Doba do lomu zkušební tyče t_r , tažnost A_r a kontrakce Z_r . Tyto charakteristiky se stanovují v případě, kdy se zjišťuje **mez pevnosti při tečení** $R_{mT}(t, T)$.

Mez pevnosti při tečení představuje napětí, které při dané teplotě způsobí porušení/lom za stanovenou dobu.

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

Označuje se R_{mT} a doplňuje se údaji o času do lomu t_f /hod/ a zkušební teplotě $T/^\circ\text{C}$ /, např. $R_{mT} 10^5/680$.

2. Trvalé prodloužení v závislosti na době zatížení. Zjišťuje se mez tečení $R_T (t/\epsilon_p /T)$.

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. $R_T 10^4/1/550$.

Vyhodnocování meze pevnosti při tečení a meze tečení se provádí na základě celé řady zkoušek. Určuje se pro dobu např. 10^3 h, 5×10^3 h nebo 10^5 h (zde je tedy doba trvání zkoušky více než 10 roků). Při ověřování žárupevnosti nové oceli je zapotřebí vyhodnotit až 30 zkušebních tyčí. Celková doba trvání zkoušek těchto tyčí bývá $(1-3) \times 10^5$ h, přičemž několik zkušebních tyčí musí mít dobu trvání zkoušky tečení více než 10^4 h.

Zkušební teplota se kontroluje zpravidla pomocí termočlánků, zaznamenává se plynule nebo v určitém časovém intervalu, např. 24h. Měření prodloužení se provádí pomocí průtahoměru s přesností nejméně 0,005 mm. Prodloužení se zaznamenává buď plynule, nebo musí být proveden dostatečný počet měření, aby bylo možné sestavit křivku tečení pro celou zkušební dobu [4].

3.6. Časová extrapolace výsledků zkoušek tečení

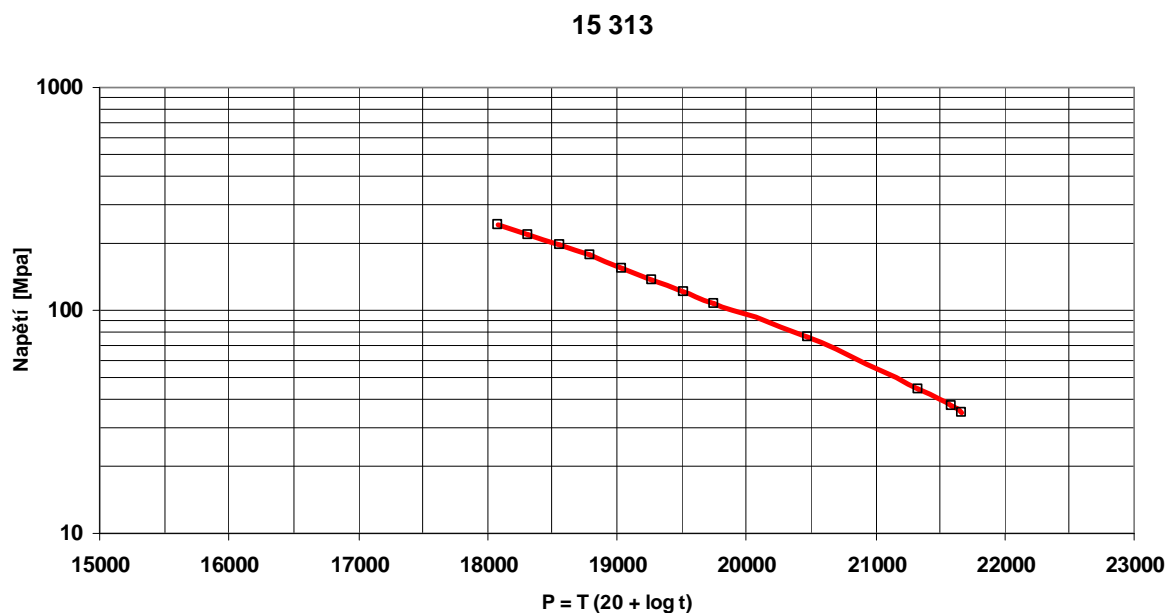
Při zkouškách tečení se provádí časové extrapolace výsledků. Důvodem je stanovit hodnoty napětí pro podstatně delší časy, než bylo zkoušeno. Používají se následující způsoby extrapolace:

Jednou z nejčastějších používaných interpolačních metod je metoda využívající Larson-Millerova parametru (*obr. 12*). Tato extrapolace vychází z platnosti Arrheniova vztahu. Lze proto při průběhu dějů nahrazovat vzájemně vliv teploty a času. Pro **Larson-Millerův parametr P** platí:

$$P = T_1 \cdot (C + \log t_1) = T_2 \cdot (C + \log t_2) \quad (9)$$

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

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 [5].



Obr. 12 Extrapolace výsledků při zkouškách tečení pomocí Larson-Millerova parametru dle ČSN 15 313

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

4. Únava materiálu

Únava materiálu je proces změn strukturního stavu materiálu a jeho vlastností vyvolaný kmitavým (cyklickým) zatěžováním, přičemž nejvyšší napětí je menší než mez pevnosti a ve většině případů i menší než mez kluzu, v důsledku něhož dochází v materiálu k hromadění poškození, které se v závěru procesu projeví růstem makroskopické trhliny a únavovým lomem.

Únava materiálu patří stále mezi nejčastější příčiny závažných havárií strojních částí a konstrukcí i přes to nebo právě proto, se této problematice ve světě věnuje pozornost už více než 150let. Únavový lom je v praxi nejčastějším mezním stavem, zhruba 80 - 90% provozních lomů má únavový charakter. Kromě kovových materiálů jsou k tomuto porušení náchylné také polymerní a keramické materiály. Příčina tohoto stavu převážně spočívá ve složitosti únavového procesu a velkém množství faktorů, které tento proces ovlivňují. Následné ekonomické ztráty pak mohou být veliké, a proto vývoj nových efektivních postupů a metod, které by umožnily posoudit spolehlivost konstrukce z hlediska vzniku únavového lomu, byl vždy předmětem intenzivního výzkumu a je stále aktuální. Jen počítané ztráty vzniklé v důsledku havárií, způsobených únavovým porušováním materiálu jsou v zemích EU odhadovány každý rok na více jak 10 miliard Eur.

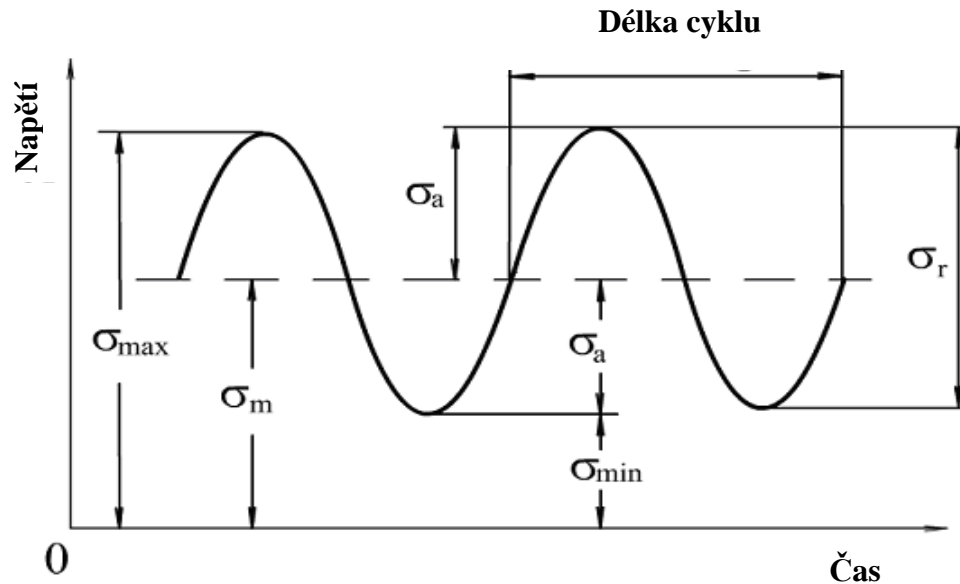
K základním mechanickým charakteristikám únavového chování konstrukčních materiálů patří

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

Obě dvě uvedené experimentální metodiky jsou využívány v inženýrské praxi. Tyto metodiky uvažují materiál/součást jako kontinuum a výsledná křivka, resp. počet cyklů nebo doba do lomu, zahrnuje všechna stadia únavového procesu [7, 8].

4.1. Klasifikování cyklického namáhání

Strojní součásti popř. celky jsou během svého života v praxi vystaveny nahodilému způsobu zatěžování. Aby tento průběh mohl dále být zpracován, je často zjednodušován, tak aby ho bylo možno empiricky popsat. Nejčastějším případem je náhrada sinusovým průběhem zatížení (*obr. 13*), i když nejmodernější zařízení pro únavové zkoušky umožňují poměrně věrně reprodukovat reálná zatěžovací spektra. Např. Labtronic L 8800 fy. Schenck, MTS, Instron, apod. Mluvíme v tomto případě pak o cyklickém zatěžování se sinusovým průběhem, které mění svoji hodnotu od minima do maxima. Tento jediný průběh napětí se nazývá jeden cyklus, čili jeden kmit.



Obr. 13 Charakteristiky souměrného střídavého namáhání [9]

V rámci jednoho zatěžovacího cyklu, charakterizovaného maximální hodnotou napětí σ_{max} a minimální hodnotou napětí σ_{min} lze vyjádřit tento cyklus následovně:

Střední napětí cyklu σ_m , které je definováno jako průměrná hodnota horního a spodního napětí neboli:

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})}{2} \quad (10)$$

Amplituda napětí σ_a : je největší hodnota proměnné složky kmitavého napětí rovnající se polovině algebraického rozdílu horního a spodního napětí kmitu:

$$\sigma_a = \pm \frac{(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})}{2} \quad (11)$$

Rozkmit napětí $\Delta\sigma$: udává rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou napětí:

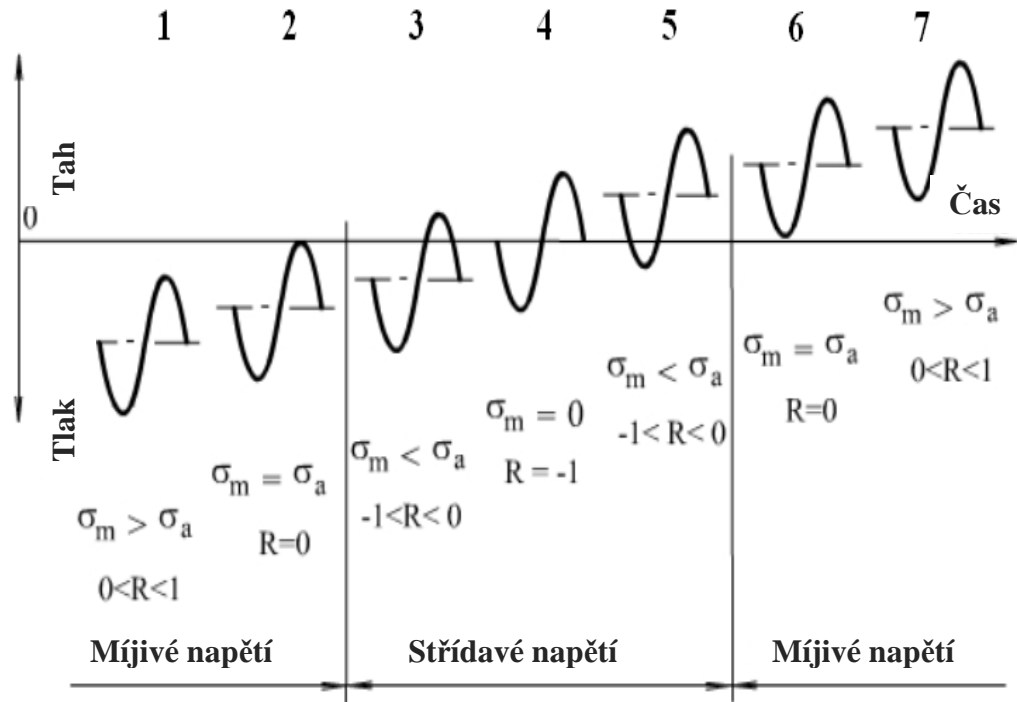
$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (12)$$

Pomocí těchto hodnot je též definovaný součinitel asymetrie cyklu R . Velikost R se pohybuje v intervalu od -1 při souměrném střídavém namáhání, do $+1$ u statického namáhání:

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{2\sigma_m}{\sigma_{\max}} - 1 \quad (13)$$

Doba, po kterou trvá jeden kmit, je nejmenší úsek, po kterém se periodicky opakují stejné průběhy napjatosti. Jednotlivé průběhy cyklického napětí se mohou různit podle poměru velikostí σ_m a σ_a , a mohou nastat následující typické průběhy napětí (*obr. 14*) [8, 11, 12].

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise



Obr. 14 Přehled základních druhů cyklického namáhání
 1-pulsující tlakové napětí, 2-míjivé tlakové, 3-záporně nesouměrné, 4-souměrné,
 5-kladně nesouměrné, 6-míjivé tahové, 7- pulsující tahové [13]

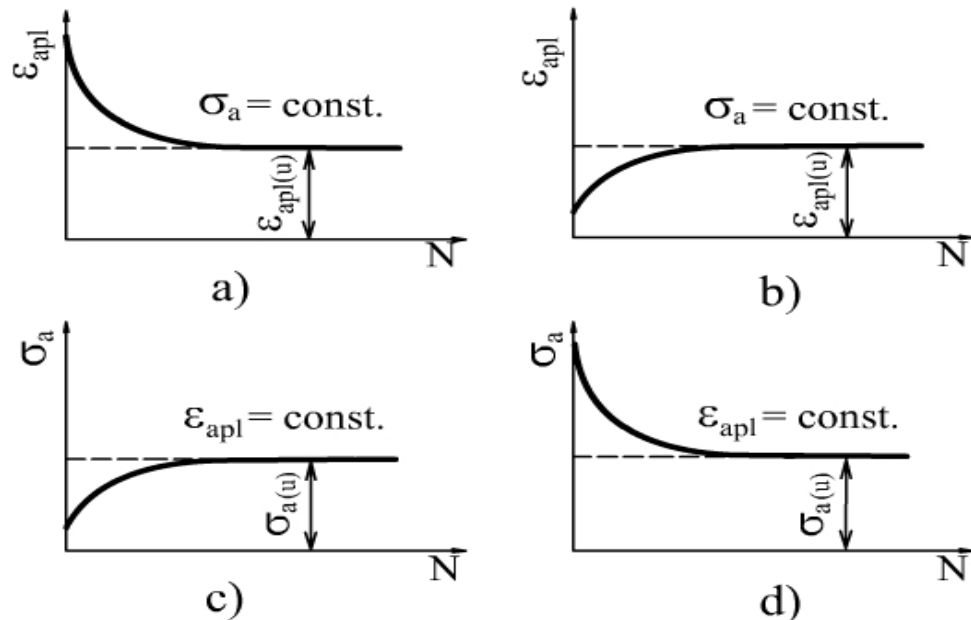
4.1.1. Stádium změn mechanických vlastností, cyklické zpevnění a změkčení

Při cyklickém zatěžování kovů a slitin dochází vlivem změn v mikrostruktuře materiálu, ke změnám mechanických a fyzikálních vlastností. Tyto změny jsou nejvýznamnější na počátku cyklického zatěžování. S rostoucím počtem cyklů jejich intenzita klesá a po poměrně malém počtu cyklů, v porovnání s celkovou životností, zcela ustanou nebo jsou nevýrazné. Odpor materiálu proti cyklické plastické deformaci může v průběhu únavového procesu růst nebo klesat v závislosti na podmínkách zatěžování, na typu materiálu a na teplotě.

Během cyklického zatěžování s konstantní amplitudou napětí se může měnit jen amplituda deformace. Pokud u daného materiálu amplituda deformace s rostoucím časem klesá, jde o případ cyklického zpevnění (*obr. 15a*), naproti tomu cyklické změkčení se projevuje růstem amplitudy deformace (*obr. 15b*). Při režimu s měnící se amplitudou napětí a konstantní

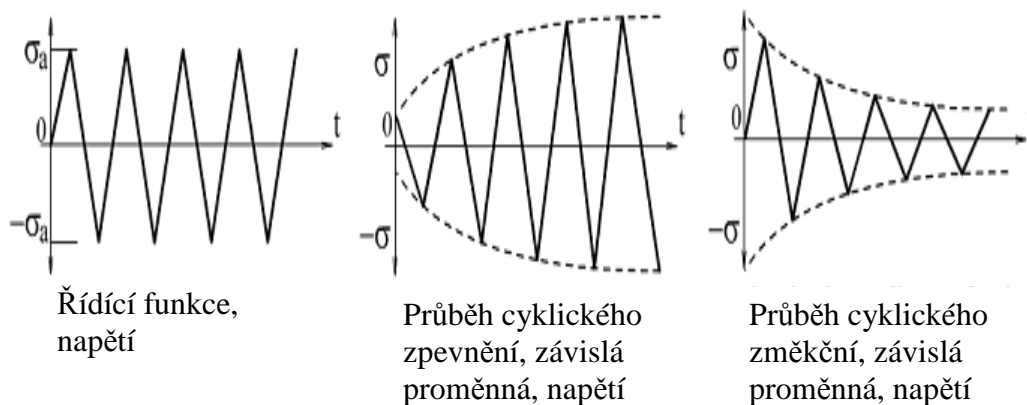
Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

deformací se cyklické zpevnění projeví růstem amplitudy napětí – roste napětí potřebné k dosažení téže deformace (**obr. 15c**), cyklické změkčení se naopak projeví poklesem amplitudy napětí – klesá napětí potřebné k dosažení téže deformace (**obr. 15d**) [14].



Obr. 15 Schématické znázornění procesu zpevnění a změkčení [15]

Na **obr. 16** je znázorněno cyklické zpevnění a změkčení v souřadnicích čas—napětí při podmínce $\varepsilon_a(u) = \text{konst.}$



Obr. 16 Průběh cyklického zpevnění a změkčení v souřadnicích: amplituda napětí σ_a —čas t [15]

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

Díky velkému množství experimentů věnovaných cyklickému zpevnění a změkčení materiálů lze shrnout poznatky o chování daných materiálů do následujícího rozdělení:

1. Cyklické zpevnění je typické pro vyžíhané materiály. Naopak cyklické změkčení je typické pro materiály zpevněné následujícími postupy: deformačním zpevněním, precipitačním vytvrzením, zpevněním martensitickou transformací, disperzním zpevněním dané cizími částicemi v matici a zpevněním příměsovými atomy legujících prvků. K cyklickému změkčení takto zpevněných materiálů může, ale také nemusí dojít, vše závisí na stabilitě předchozího zpevnění a na zatěžovacích podmínkách. Z hlediska praktického použití materiálů je cyklické změkčení zpravidla jev nežádoucí.

2. Zda se bude materiál cyklicky zpevňovat nebo změkčovat lze určit pomocí poměru R_m/R_e . Pokud je poměr $R_m/R_e > 1,4$, dojde k cyklickému zpevnění. Je-li poměr $R_m/R_e < 1,2$, dojde k cyklickému změkčení. Pro hodnoty ležící mezi 1,2 a 1,4 není chování jisté [16].

3. Nejdůležitějším parametrem ovlivňujícím délku trvání cyklického zpevnění a změkčení je charakter skluzu daného materiálu. Pomocí tohoto hlediska lze kovy a slitiny rozdělit na dvě skupiny. Na kovy s vlnitým charakterem skluzu jako jsou kovy se snadným příčným skluzem Cu, Fe, Al, uhlíkové oceli a na kovy s rovinným charakterem skluzu, austenitické ocele, α -mosaz atd. Délka trvání cyklického zpevnění či změkčení u kovů s vlnitým charakterem skluzu je značně menší než u kovů s rovinným charakterem skluzu [12, 16].

4.1.2. Stádium vzniku únavových trhlin

Únavový proces je velmi citlivý na stav povrchu, tudíž celá únavová životnost je výrazně ovlivněna povrchovým zpracováním. Příčinou této citlivosti je skutečnost, že ke vzniku respektive k nukleaci únavových trhlin dochází ve většině případů na volném povrchu zatěžovaných kovů tj. v místech koncentrace cyklické plastické deformace. Kromě makroskopických důvodů, kterými mohou být např. vruby a zvýšení hladiny napětí na povrchu, přispívají ještě mikroskopické koncentrátoři, které se uplatňují i za podmínek ideálního homogenního zatěžování, kdy nedochází k excentrickému působení zátěžné síly.

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

Hladina povrchového napětí je také citlivá na povrchovou topografii, přičemž žádný povrch není ideálně rovný. Působením plastické deformace dochází k postupu dislokací na volný povrch a vytváření povrchového reliéfu. Takže i v případě původně ideálně rovného povrchu se v průběhu zatěžování vytvoří povrchové nerovnosti, které následně působí jako velmi lokalizované koncentrátoři napětí. Nejčastěji se vyskytují tři základní typy nukleačních míst [14]:

1. únavová skluzová pásma – nejběžnější typ
2. hranice zrn – v případě vysokoamplitudové únavy zejména za zvýšených teplot
3. rozhraní mezi inkluzemi a maticí – v případě některých komerčních slitin a vícefázových materiálů, ve kterých se vyskytují tvrdé inkluze řádově velikosti mikronů.

Všechny tyto typy nukleace mají jedno společné, a to, že místem koncentrace cyklické plastické deformace je povrchová vrstva. S rostoucím počtem cyklů roste jak intenzita, tak i četnost skluzových pásem. Povrchový reliéf je tak tvořen „pohořími“ a „údolími“, tzv. extruzemi a intruzemi. Tvorba skluzových pásem začíná zpravidla až ke konci prvního stádia únavového procesu, tedy až jsou procesy v celém objemu zatěžovaného kovu prakticky ukončeny. S přibývajícím počtem cyklů roste intenzita i četnost skluzových pásem. V případě, že by došlo před obdobím šíření trhliny k odstranění povrchové vrstvy např. odleštěním, dojde k podstatnému zvýšení únavové životnosti. Tímto odleštěním dojde k odstranění mikrotrhlin, pokud již vznikly a také k odstranění extruzí a zejména intruzí [12, 16, 18].

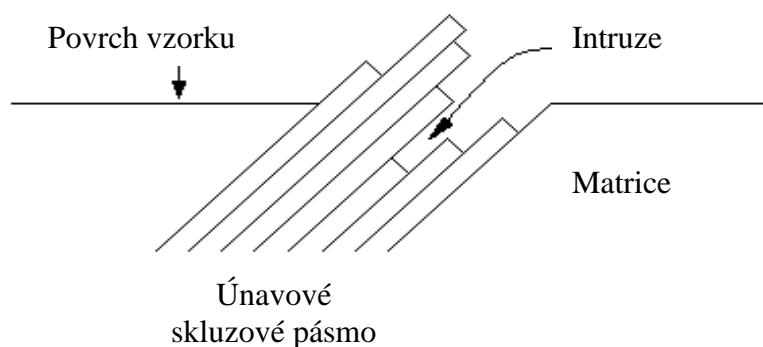
Pro vlastní nukleaci mikrotrhlin bylo navrženo několik modelů. Je zřejmé, že únavové mechanismy se mohou uplatňovat jen v nukleačních místech, tedy v kořeni intruze v únavových skluzových pásmech, nebo v blízkosti intruze, případně v okolí hranice zrna. Otázkou zůstává, zda existuje vůbec zřetelný rozdíl mezi ostrou intruzí a mikrotrhlinou. Žádný z mechanismů snažících se popsat mechanismus nukleace trhliny není plně uspokojující a přímá experimentální verifikace není v plném rozsahu možná.

Mechanismy nukleace lze zhruba rozdělit do pěti skupin.

- **Mechanismus nerozlišující mezi intruzí a mikrotrhlinou**

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

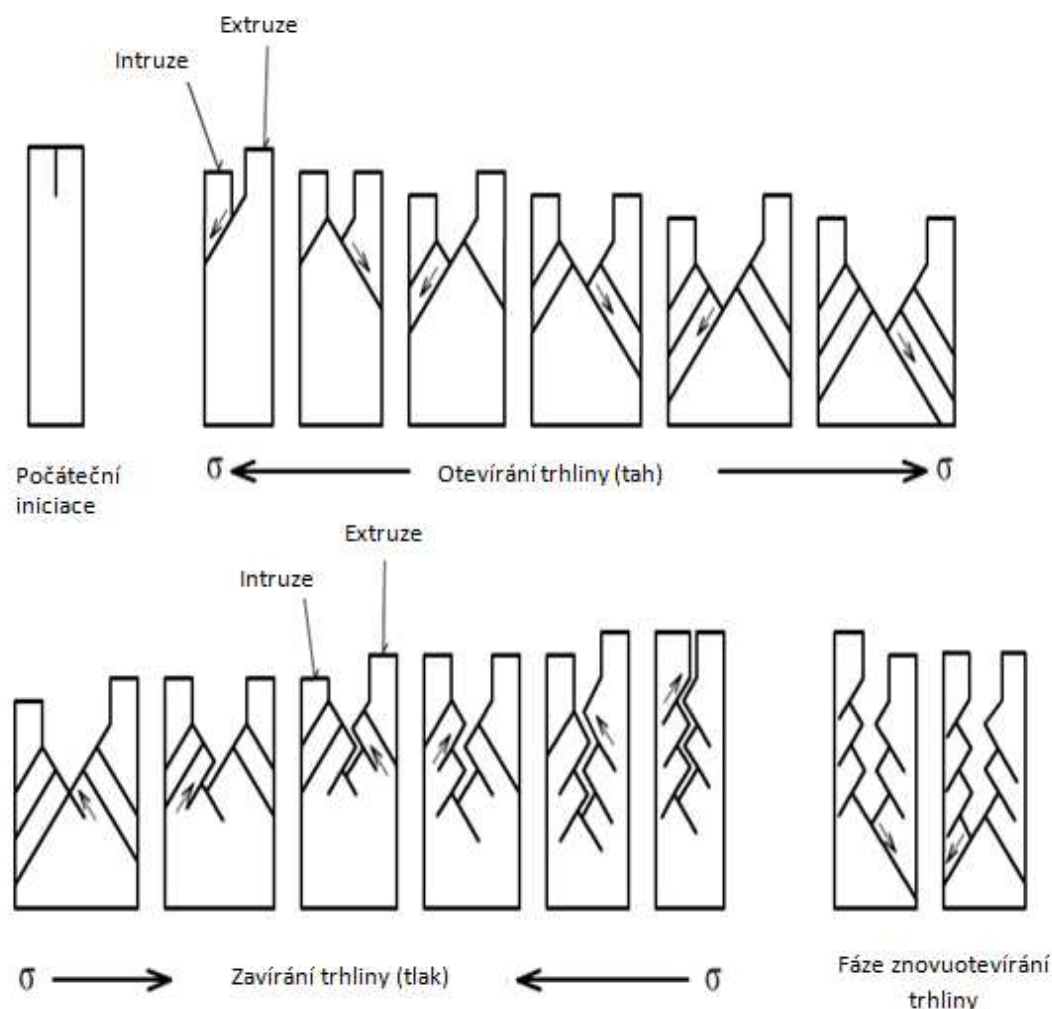
V tomto nejčastěji používaném modelu je vznik mikrotrhlin chápán jako kontinuální prorůstání intruze do hloubky, a to pomocí opakovaného skluzu na jednom nebo dvou skluzových systémech. V případě skluzu na jednom skluzovém systému je základem představy relativní pohyb více vzájemně rovnoběžných karet (**obr. 17**). Předpokládá se, že vytvořená intruze působí jako koncentrátor napětí a tím indukuje další skluzu v kořeni intruze. Oblast mezi pohybujícími se „kartami“ může být v průběhu cyklické deformace spojitě vytlačována nebo vtlačována do krystalu. V případě, že dochází k vtlačování oblasti vzniká spojitě rostoucí intruze, která je v daném pojetí vlastně mikrotrhlinou.



Obr. 17 Představa kartového skluzu v perzistentním skluzovém pásmu [15]

Pro druhý případ, kdy dochází ke střídavému skluzu na dvou nekomplanárních systémech, předložil Neumann model tvorby mikrotrhlin postupným přechodem z povrchové intruze (**obr. 18**).

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise



Obr. 18 Neumanův model tvorby mikrotrhliny [15]

- **Nukleace křehkým prasknutím v kořeni intruze**

Tato představa nerozlišuje mezi intruzí a trhlinou. V místě nukleace jsou typy struktury a typy povrchového reliéfu silně závislé zejména na snadnosti příčného skluzu a amplitudě zatěžování. Ke vzniku mikrotrhlin dochází vždy na ostrých intruzích bez ohledu na typ okolních dislokačních struktur. Jinými slovy, tvorba prvních mikrotrhlin je křehkého typu [18].

- **Vznik trhlin kondenzací vakancí.**

Některé dislokační interakce vedou k vzniku vakancí. V průběhu cyklické deformace byla experimentálně zjištěna vysoká koncentrace vakancí v celém zatěžovaném objemu. Vzniklé

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

vakance mohou následně vytvářet shluky a dutiny. Dutinu o dostatečné velikosti je již možné považovat za trhlinu. Tato představa implicitně předpokládá difúzi vakancí, která je silně závislá na teplotě. Difúze vakancí, ale není nutnou podmínkou pro nukleaci trhlin, jak bylo prokázáno během experimentálních měření při teplotách 1,7 K. Ovšem při cyklickém zatěžování v oblasti vyšších teplot, kdy se již uplatňuje creep, se může mechanismus kondenzace vakancí na nukleaci podílet [19].

- **Dekoheze krystalu podél skluzové roviny způsobená akumulací dislokací.**

Základní představa je taková, že v kritických místech se vytváří taková konfigurace dislokací, která vede k lokálnímu zvýšení napětí nebo energie dostačující ke ztrátě koheze v oblastech velikosti několika Å až několik desítek Å [19].

- **Nukleace na hranicích zrn.**

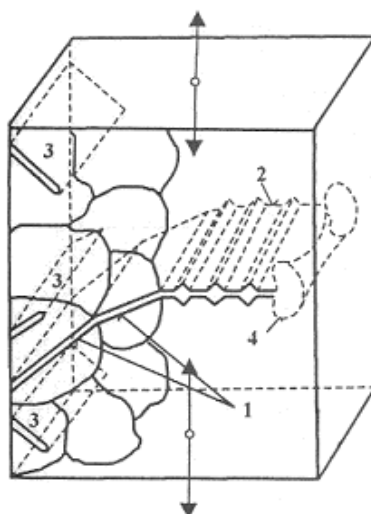
V tomto mechanismu dochází k tvorbě intruze přímo na hranici zrn, ze které se následně může vyvinout mikrotrhlina. Tento experimentálně dobře doložený mechanismus je aplikovatelný jen pro velmi vysoké amplitudy zatěžování, které odpovídá počtu cyklů do lomu řádu 10^3 . V místě takto vysokých amplitud dochází k intenzivní cyklické plastické deformaci prakticky celé povrchové vrstvy jednotlivých zrn. V místě hranice zrn nemůže však deformace proběhnout – cyklické posunutí kolmé k povrchu je v místě hranice téměř nulové. Z tohoto důvodu, se může intruze vytvářet v místě hranice zrna. Tato geometrická představa popisuje jen tvorbu intruzí na hranicích zrna a předpokládá, že není rozdíl mezi intruzí a mikrotrhlinou [12,18,19].

4.1.3. Šíření únavových trhlin

Nukleační stádium je zakončeno vytvořením povrchových mikrotrhlin. Tyto mikrotrhliny leží podél aktivních skluzových rovin, kterými jsou roviny s největším smykovým napětím. Přičemž při jednoosém zatěžování je největší smykové napětí v rovinách svírajících úhel 45° s vektorem vnějšího napětí (*obr. 19*). V dalším průběhu cyklického zatěžování se trhliny prohlubují a rostou do hloubky. Velká většina se však brzy zastavuje a jen malá část proniká do hloubek větších než několik desítky mikronů. S narůstající délkou se trhliny vychylují

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

z aktivních skluzových rovin a stáčí se do směru kolmého na vektor hlavního napětí. Na jejich čele lze identifikovat plastickou zónu vznikající účinkem vysoké koncentrace napětí. V této etapě se šíří zpravidla již jen jedna trhlinka označovaná jako magistrální. Pro šíření podél aktivních skluzových rovin se používá označení první etapa šíření a pro šíření kolmo na vektor hlavního napětí druhá etapa šíření únavové trhliny [12,18, 20].



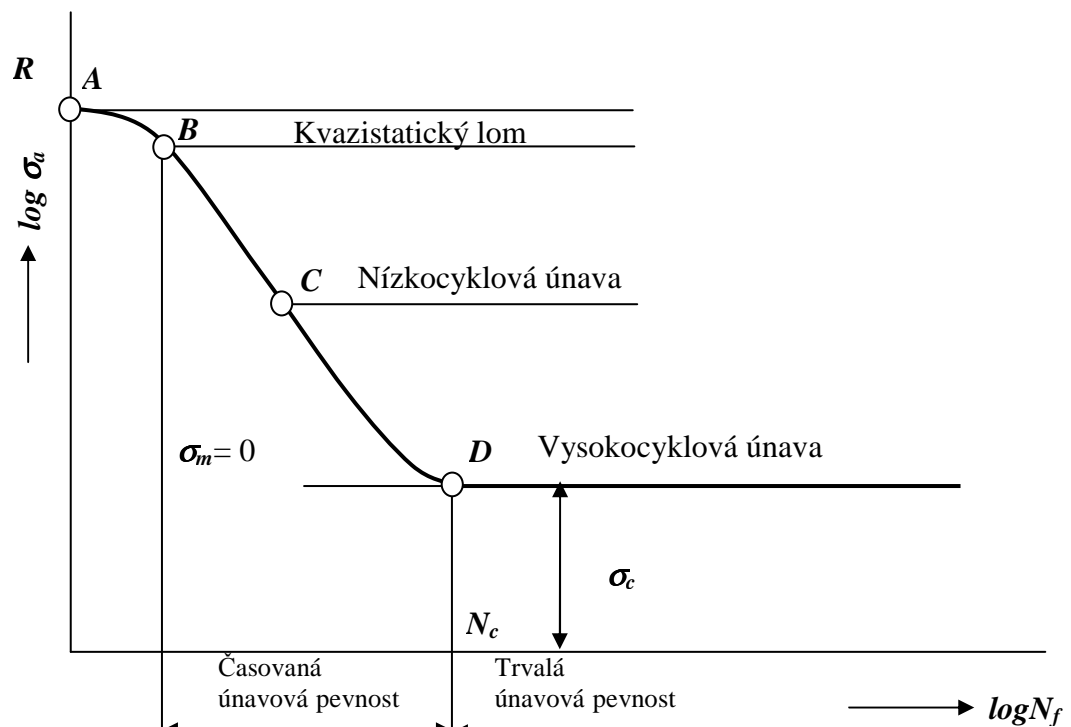
Obr. 19 Schéma postupu šíření únavových trhlín 1 - první etapa šíření, 2 - druhá etapa šíření, 3 - neefektivní trhliny; 4 - plastická zóna na čele trhlín [20]

Stádium šíření trhliny je také jediné stadium, kdy lze definovat stupeň únavového poškození, které je přímo úměrné délce trhliny. Délka trhliny, při které dochází k přechodu z první do druhé etapy šíření závisí především na druhu materiálu a na amplitudě zatěžování. Čím menší je pro daný materiál amplituda zatěžování, tím delší trhlina odpovídá první etapě. Šíření v druhé etapě končí náhlým lomem zbývající části nosného průřezu [12].

4.2. Hodnocení odolnosti materiálu proti únavovému porušení

Z historického hlediska je názorné rozdělení únavového procesu v závislosti mezi hodnotou napětí a počtem kmitů, jehož základy položil již Ing. August Wöhler v letech 1852 – 1870, při studiu poškozování náprav železničních vagónů, únavová $S-N$ křivka (*obr. 20*). Podle svého tvůrce zvaná též Wöhlerova křivka, která je dodnes nejpoužívanější únavovou charakteristikou a patří mezi determinované základní charakteristiky materiálu [18].

Z hlediska praktických aplikací ve strojírenství jsou podstatné zejména oblasti nízkocyklové a vysokocyklové únavy, neboť zde dochází k únavovému poškozování po mnoha cyklech. V kvzistatické oblasti dochází k lomu po několika cyklech za současného vzniku velké plastické deformace (tvorba krčku v analogii se statickými zkouškami).

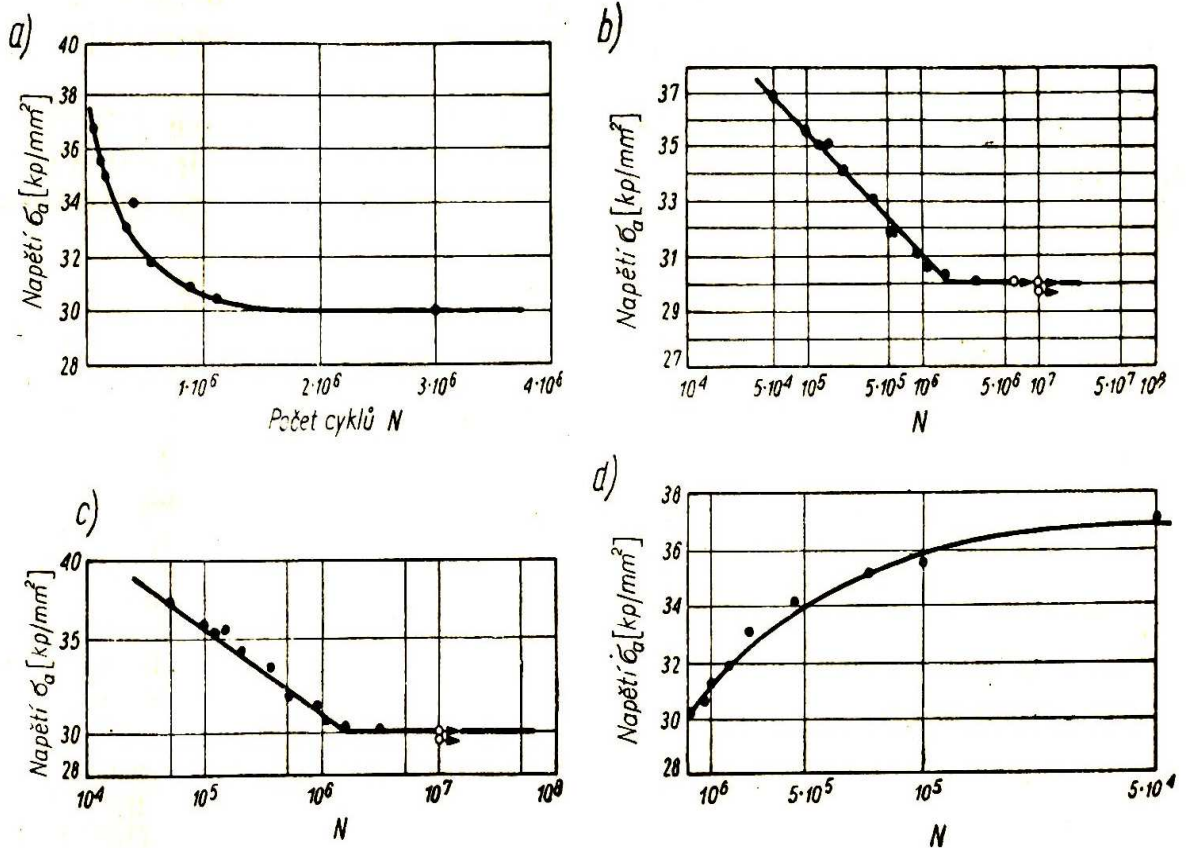


Obr. 20 Schématický průběh křivky životnosti [18]

Tedy je-li zkušební tyč nebo součást konstrukce podrobena dostatečně velkému cyklicky se měnícímu napětí, pak za určitou dobu dojde ke vzniku únavové trhliny a následně k lomu součásti. V případě, že je zkouška opakována při vyšší úrovni napětí, pak počet cyklů do porušení bude menší. Výsledkem takovýchto zkoušek provedených při různých úrovních

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

napětí je křivka napětí-únavový život, také nazývaná $S-N$ křivka. Amplituda napětí nebo nominálního napětí, σ_a nebo S_a , se obecně vynáší na počtu cyklů do porušení N_f jak je uvedeno na *obr. 21*.



Obr. 21 Způsob znázornění vztahu mezi napětím σ_a nebo S_a a počtu cyklů do porušení N_f
[12]

Skupina takovýchto únavových zkoušek pro vyjádření $S-N$ křivky se zpravidla provádí při nulovém středním napětí, nebo pro některé specifické případy s nenulovým středním napětím σ_m . Též se někdy měří křivky $S-N$ při konstantní hodnotě součinitele nesymetrie cyklu, R . Přestože napětí je obvykle vynášeno jako amplituda, můžeme se setkat i s veličinami $\Delta\sigma$ nebo σ_{max} .

Počet cyklů do porušení N_f se mění v rozmezí několika řádů s úrovní působícího napětí. Z tohoto důvodu je počet cyklů do porušení obvykle vynášen v logaritmické stupnici. Problémy s lineární stupnicí jsou zřejmé z *obr. 21*, kde je stejná závislost $S-N$ vynesena

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

jednou v lineární (a) a podruhé v logaritmické stupnici (b). V případě lineární stupnice prakticky není možné odečíst počty cyklů do porušení při malém únavovém životě. Logaritmické měřítko se někdy používá i v případě osy napětí.

Některé konstrukční materiály, zvláště nízkouhlíkové a nízkolegované oceli, mají závislost $S-N$ charakteristickou tím, že prakticky od hodnoty N_f řádově 10^6 amplituda napětí S již prakticky neklesá – tj. existuje jistá úroveň napětí, pod kterou nedochází k únavovému porušení. Tato limitní amplituda napětí se nazývá mez únavy.

Pro zkušební tělesa bez vrubu s hladkým povrchem se pro mez únavy používá symbol σ_c (σ_e) a zpravidla se hovoří o materiálové charakteristice. Pro materiály u nichž $S-N$ křivka nemá zmíněný asymptotický tvar, jako jsou např. slitiny hliníku i mědi, se mez únavy uvažuje jako amplituda napětí odpovídající určité smluvní době života 10^7 nebo 10^8 cyklů [8, 12, 18, 21, 22].

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

5. Metoda Small Punch test

Small Punch (SP) test byl poprvé proveden v roce 1981 v MIT pro účely studia radiačního zkrěhnutí. Ke značnému rozvoji této metody došlo v Japonsku, na Tohoku univerzitě v Sendai. První pokusy o standardizaci **SP** testu byly uskutečněny v japonském Institutu pro výzkum atomové energie (JAERI) v roce 1988. V Evropě je tato metoda známa od roku 1992, kdy ji představila Swansea University ve Walesu, dále pak CISE (nyní CESI) v Itálii.

Instituce provádějící Small Punch Test v České republice a Slovenské republice:

- Institut fyziky a materiálů, Brno,
- Vítkovice- Výzkum a Rozvoj, s.r. o., Ostrava,
- COMTES FHT a.s.
- Mechanická zkušebna, VZÚ Plzeň, s.r.o.
- Výzkumný institut pro atomovou energii, Trnava.

5.1. Obecná charakteristika

Tato metoda používá zkušební tělesa ve tvaru malého disku, obvykle o průměru 3 – 10 mm a tloušťce 0,25 – 0,5 mm, upevněného podél jeho obvodu a zatěžovaného kulovým vnikacím tělískem – indentorem do porušení. Podpora po obvodu disku může existovat jako pouhé podepření nebo je disk po obvodu pevně upnutý (vetknutý) tlakovou přítláčnou silou.

Základním cílem výzkumu zkušební metody SP byla její aplikace pro hodnocení integrity konstrukcí rozsahu provozní degradace a odhadu zbytkové životnosti ocelových komponent energetických zařízení [23].

Hlavní výhody **SP** testu mohou být shrnuty takto:

- „nedestruktivní“ hodnocení mechanických vlastností materiálu,
- hodnocení nových materiálů či slitin, u kterých je k dispozici jen omezené množství materiálu,
- hodnocení svařenců včetně svaru a oblastí ovlivněných teplem uvnitř základního kovu,

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

- hodnocení mechanických vlastností keramických materiálů v širokém rozmezí teplot,
- hodnocení mechanických vlastností povlaků a povlakovaných materiálů,
- analýza příčin lomů součástí, u nichž je omezena dostupnost materiálů.

Přes intenzivní výzkum v této oblasti však existuje řada negativních aspektů:

- **SP** technologie se stále soustřeďuje v několika laboratořích, pouze na klíčových univerzitách a výzkumných ústavech.
- V současné době nelze spolehlivě vysvětlit, jak výsledky testu závisí na konkrétních zkušebních podmínkách. Současně existuje potřeba vývoje univerzálně platné a méně empirické zkušební metodiky a rovněž studia konkrétních materiálových korelací umožňujících analýzu získaných výsledků.
- Testovací standardy neexistují (pouze v Japonském kódu pro speciální testy, speciální materiály). V rámci projektu Copernicus **SP** (EC project, 1994-1997) byla vyvinuta zkušební metoda, ale nebyl předložen návrh normy [24]
- Všechna použití v předchozích letech zvažovala pouze feritické a martensitické oceli. Tyto metody nebyly nikdy aplikovány na austenitických ocelích. Použití pro svarové spoje je též nedostatečně prozkoumáno.
- Studie zaměřené na povlaky jsou většinou ve stadiu výzkumu [25].

5.2. Zkoušky na malých vzorcích

Díky vysoké přesnosti současných trhacích strojů, řízení zkušebního procesu počítači a výstupům ve formě digitálního záznamu na jedné straně a znalostem vlivu konstrukčních faktorů a zkušebních podmínek na druhé straně, zajišťují současné penetrační testy malých vzorků vysokou úroveň přesnosti a reprodukovatelnosti výsledků srovnatelných s běžnými zkouškami mechanických vlastností [26].

Princip penetračního testu spočívá v průniku zvláštního razníku přes plochý vzorek tvaru disku nebo ploché destičky, který je uchycen mezi horním přidržovačem a dolní maticí.

Podle Lucase můžeme rozdělit penetrační testy na:

- a) ohybový test (Disc Bend Test),

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

- b) stříhový test (Shear Punch Test),
- c) kuličkový test (Bulge Test) [27].

Při protlačování kuličky, resp. razníku s hemisférickou plochou se jedná o kuličkový test, stříhový test používá ostrohranného válcového razníku. Jednou z alternativ kuličkové zkoušky je tzv. ohybový test, kdy je vzorek pouze podložen matricí a razník je ve tvaru kužele.

Tato práce pojednává výhradně o kuličkovém testu, neboť je nepraktičtější a nejpoužívanější.

Kuličkový test je založen na protlačování kuličky popř. razníku s hemisférickou plochou přes plochý tvar malého zkušebního tělesa ve tvaru disku (penízku) (*obr. 22*), o průměru 8 mm a tloušťce 0,5 mm [28].

Na *obr. 23* je znázorněn tvar vzorku pro zkoušky únavy, který lze vyrobit z odebraného materiálu. Těmto vzorkům bude věnována větší pozornost v praktické části této práce. *Obr. 24* znázorňuje velikost odebraného vzorku, detail místa po odběru je znázorněn na *obr. 25*.



Obr. 22 Malý vzorek – penetrační test [29]



Obr. 23 Malý vzorek – zkouška únavy [29]



Obr. 24 Místo odběru vzorku zařízením SSam -2 [29]

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise



Obr. 25 Místo odběru [29]

Penetrace v případě kuličkové zkoušky se provádí hemisféricky broušenými razníky o průměru $2 \div 2,5$ mm, v našem případě d_m , 2,5 mm. Napětí působící na vzorek při kuličkovém testu závisí na různých okolnostech (závisí např. na tloušťce vzorku, průměru kuličky, sevření vzorku, průměru otvoru ve spodní matici, na kontaktu kuličky a vzorku atd.) [30].

V průběhu testu je snímána závislost průhybu na zatěžovací síle. Ze získaného záznamu se vyhodnocuje síla F_m (F_{max}), deformace vzorku při maximální síle průhyb vzorku při náhlém porušení d_f a energie potřebná k náhlému porušení vzorku. Dále se na porušeném vzorku vyhodnocuje nejmenší tloušťka tělesa v místě trhliny t_f .

Mezi základními mechanickými vlastnostmi získanými při klasické zkoušce ($R_e/R_{p0.2}$, R_m) a hodnotami mechanických vlastností získanými při kuličkovém testu je možné odvodit jejich závislosti.

U kuličkového i stříhového testu je záznam závislosti na počátku testu lineární a je analogický Hookovu zákonu při zkoušce tahem. V okamžiku ztráty linearitu, která je u kuličkového testu pro stejnou tloušťku vzorku i stejný průměr razníku pozorována při nižších hodnotách než u stříhové zkoušky, se v obou případech předpokládá dosažení napětí blízkého mezi kluzu v testovaném materiálu. U stříhového testu dále následuje plastická deformace vzorku převážně stříhovým mechanismem až k maximálnímu napětí, které je indikováno maximem v záznamu zatížení – deformace. V případě kuličkového testu je po dosažení meze kluzu indikován

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

pokles zatížení, který je vysvětlován tzv. membránovým efektem při průběžné změně úhlu styku penetrující kuličky s deformovaným vzorkem. Po docílení úhlu cca 30° (u ocelí s mezí pevnosti až do 700 MPa) dochází dále k parabolickému zpevnění až k maximálnímu zatížení, jako v případě stříhového testu [27].

Penetrační testy malých vzorků jsou využívány pro:

- odhad meze kluzu a meze pevnosti při laboratorní teplotě
- odhad transiční teploty *FATT*,
- stanovení žáropevných charakteristik za vysokých teplot,
- odhad lomové houževnatosti materiálu.

5.3. Odběr vzorků

Tradiční odběr zkušebního tělesa představuje nevhodný zásah do celistvosti hodnocené 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 tepelného ošetření a řady nedestruktivních kontrol. Toto místo se často stává zdrojem dalších potíží včetně možnosti vzniku trhlin při dalším provozu.

Klíčovým problémem u zkoušek typu small punch je odběr vzorků materiálu z rozhodujících součástí (s možnou životností 20 a více let) takovým způsobem, aby nedošlo k ovlivnění součásti, ani aby vlastnosti materiálu zkušebních vzorků nebyly ovlivněny procesem odběru.

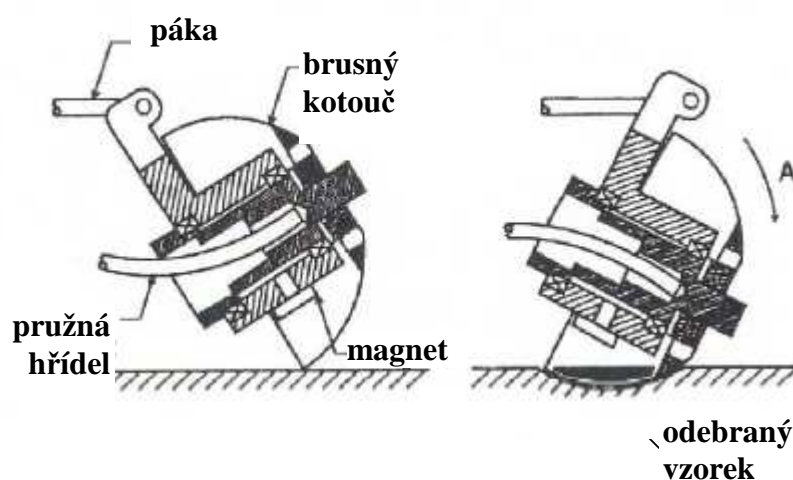
Pro odebrání malých vzorků bylo firmou Rolls Royce vyvinuto zařízení SSam – 2. Odběr vzorku je založen na odbroušení mezivrstvy mezi vzorkem a součástí pomocí rotujícího nástroje tvaru kloboučku o tloušťce 0,7 mm a průměru 50 mm, který je vodou chlazený a pomalu se zavádí do základního materiálu a odebírá kulovitý vzorek materiálu. Celý proces odběru, trvající asi 1 – 3 hod., umožní získat vzorek ve tvaru kulového vrchlíku o průměru 25 mm a výšce 3 – 4 mm. Z tohoto segmentu se posléze vyrábějí (obvykle elektroerozivní metodou) malá válcovitá zkušební tělíska, přičemž je nutno pečlivě kontrolovat jejich výslednou tloušťku. Z takto odebraného vzorku zařízením SSam – 2 ve tvaru kulového vrchlíku je možno připravit až čtyři „penízky“ (*obr. 26*) - vzorky pro *SP* testy [29].

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise



Obr. 26 Vzorky pro SP test odebrané ze zkušebního materiálu [29]

Používání SSam – 2 se rozšířilo do celé Evropy a to jak díky prodeji licencí na přístroj pro odběr vzorků, tak i poskytováním služeb na odběr vzorků. V současné době vlastní přístroj na odběr vzorků: Ansaldo (Itálie), Vítkovice (Česká republika) a na Technické univerzitě v Krakově (Polsko) [25]. Výhradním výrobcem tohoto zařízení je firma Rolls Royce Ltd. (Velká Británie).



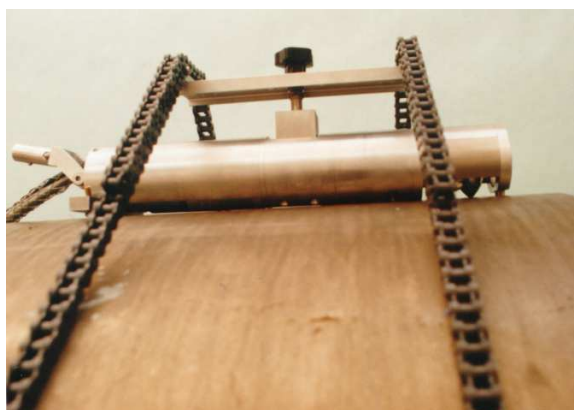
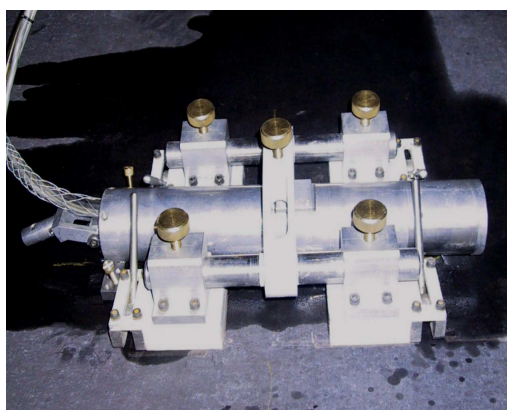
Obr. 27 Schéma odběru materiálu zařízením SSam-2 [31]

Absence tepelného a deformačního ovlivnění u odebraného vzorku i testované součásti je zajištěna vysokou obvodovou rychlostí odbrušovacího nástroje a pomalým posuvem do záběru za současného intenzivního chlazení chladicí kapalinou (zpravidla vodou). Zařízení SSam umožňuje provádět odběry jak na vnějším povrchu testovaných dílů, tak v jejich dutinách (tlakové nádoby, potrubí atd.). Schématické znázornění odběru je možné vidět na **obr. 27**. Praktická ukázka odběru materiálu je na **obr. 30**.

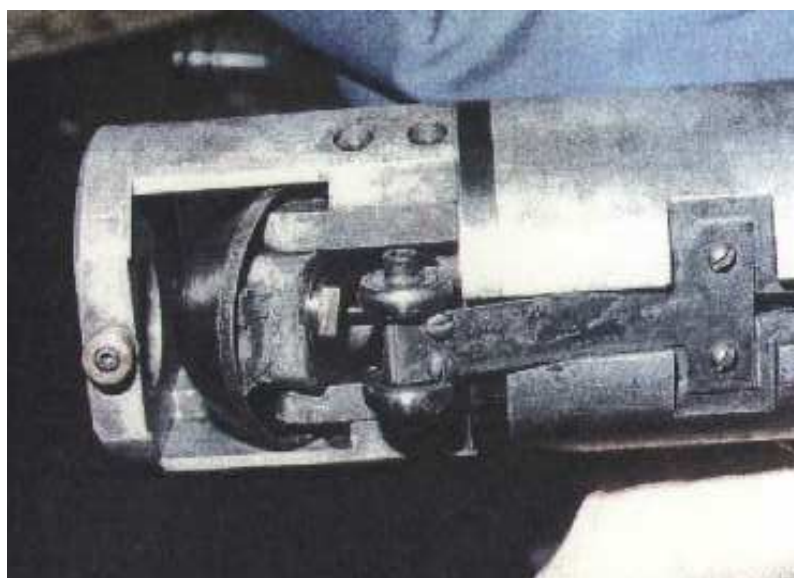
Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

Zařízení SSam – 2 se skládá z těchto částí:

- vlastní odběrové zařízení (*obr. 28 a obr. 29*), které umožňuje provádět odběr vzorků jak na vnějším povrchu, tak i v dutinách testované součásti,
- řídicí jednotka, která umožňuje naprogramovat způsob odběru malých vzorků
- vodní čerpadlo, které je používáno pro intenzivní chlazení řezného kloboučku chladicí kapalinou [29].



Obr. 28 Zařízení pro odběr na vnějším povrchu, magnetické (vlevo), mechanické (vpravo) [29]



Obr. 29 Zařízení pro odběr materiálu od firmy Rolls Royce - Ssam 2 [29], detail „odběrové hlavy“

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise



Obr. 30 Ukázka odběru materiálu ve ŠKODA POWER A DOOSAN company, firmou MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o.

Další přístroj na odběr vzorků založený na elektrojiskrovém obrábění byl vyvinut v Itálii v institutu CISE (nyní CESI. V tomto případě je elektroda vyrobena ze zvláštní slitiny CuW nebo z Ag 925 barů. Během řezu se přístroj otáčí okolo své osy, takže odebíraným materiálem je odřezek kulovitého tvaru.

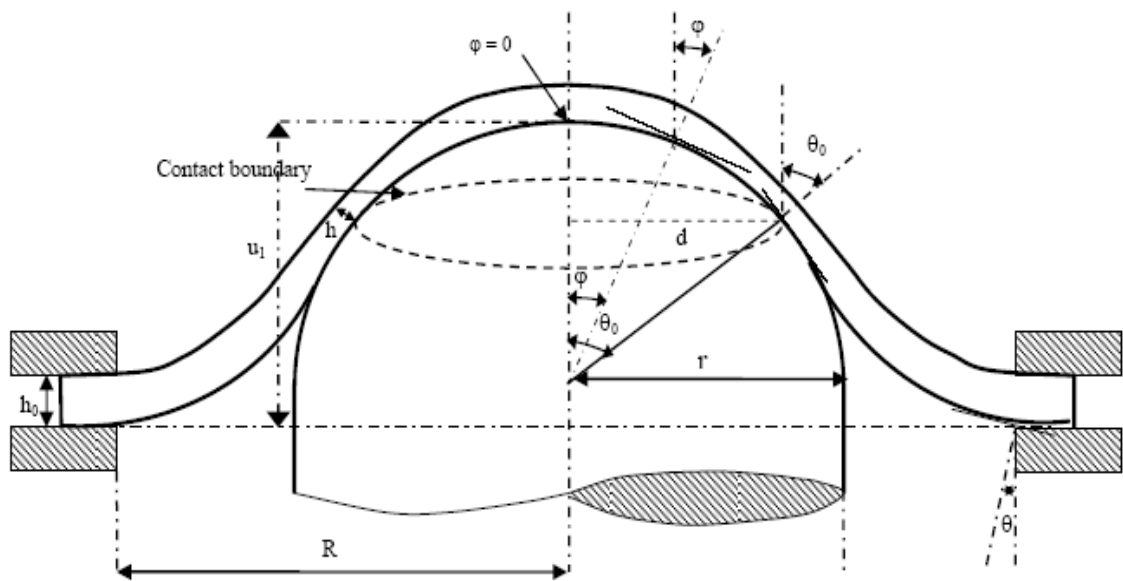
Dobrymi vlastnostmi elektrojiskrového obrábění jsou:

- minimální zbytkové pnutí vzniklé v důsledku odběru,
- nízké náklady a snadná nahraditelnost materiálu spotřebovaného při řezání,
- tvar vzorku (tzn. hloubka x plocha povrchu) je možné měnit a volit podle potřeby [32].

Použitím jednoduchých přídatných zařízení, umožňujících změnu teplotních, resp. deformačních podmínek, lze pomocí malých vzorků ověřovat pevnostní vlastnosti jak za vyšších teplot (do cca 650 °C), tak při nižších teplotách (do - 196°C).

5.4. Důležitost výsledků SP testu: korelace s výsledky jednoosých zkoušek

Aby bylo možno porovnávat a korelovat výsledky creepových **SP** testů a klasických zkoušek jednoosým tahem, bylo navrženo několik modelů, z nichž většina není jednoduše aplikovatelná, protože jednak definice ekvivalentního napětí při **SP** testech by vyžadovala podrobnou matematickou analýzu, jednak chybí znalost několika ne zcela jednoduše dostupných materiálových parametrů (např. Monkman-Grantovy konstanty, Nortonových parametrů, tažnosti, creepových dat při konstantním napětí atd.). Existují také četné relativně jednoduché vztahy u nichž ekvivalence napětí je založena na stanovení obvodového membránového napětí, které způsobí porušení **SP** disku [25]. Příslušné geometrické veličiny jsou definovány na **obr. 31** [25, 31].



Obr. 31 Definice geometrických parametrů [25, 31]

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
h_0 – 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 vlačovací kuličky	u_1 – posunutí razidla ($\varphi = 0$)
d – poloměr vzorku v místě trhliny	

Vzájemné vztahy mezi F a σ při **SP** creepu jsou následující [31]:

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

- a) vztah, který navrhl Bicego v rámci evropském projektu COPERNICUS, zabývající se metodou **SP** test

$$\frac{F}{\sigma} = [2\pi h(r + h/2)\sin\theta_0]\sin\theta_0 \quad (14)$$

- b) formulace podle Dobeše a Miličky [33]:

$$\frac{F}{\sigma} = \frac{[2\pi h r \cdot \tan \varphi]}{[1 + \tan^2 \cdot \varphi]^{1/2}} \quad (15)$$

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

$$\frac{F}{\sigma} = \frac{[2\pi h r \cdot \sin \theta_0 \cdot \tan \theta_0]}{[1 + \tan^2 \theta_0]^{1/2}} \quad (16)$$

- c) rovnice navržená podle Chakabartyho [25]

$$\frac{F}{\sigma} = 2\pi h_0 r \cdot \sin^2 \cdot \theta_0 \cdot \left\{ \frac{1 + \cos \theta_0}{1 + \cos \theta} \right\}^2 \quad (17)$$

- d) formulace podle Tettamantiho a Crudeliho [25]

$$\frac{F}{\sigma} = K \cdot \left[2\pi h r \cdot \left(\frac{D}{2R} - \chi \right) \right] \quad (18)$$

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

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

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

Navrhovaná hodnota v případě upnutého vzorku: $F/\sigma = 1,95 \sim 2,06$, v případě neupnutého vzorku: $F/\sigma = 2$.

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

e) nejnovejší formulace získaná z výzkumného ústavu v Rossendorfu v Německu [31]:

$$\frac{F}{\sigma} = 3.33k_{sp} R^{-0.2} r^{1.2} h_0 \quad (19)$$

5.5. Hodnocení aktuálních křehkolomových vlastností energetických zařízení pomocí penetračních testů

V této části je popsán postup pro hodnocení aktuální úrovně **FATT** (**Fracture Appearance Transition Temperature**) a lomové houževnatosti materiálů energetických zařízení na základě výsledků SP testů v rozmezí teplot – 196 až + 60 °C.

Posuzování zbytkové životnosti či integrity komponent energetických zařízení vyžaduje znalost i aktuálních nekonvenčních mechanických vlastností použitých materiálů. Vlastnosti materiálů mohou být v průběhu provozu zařízení degradovány stárnutím. Je to proces vedoucí ke změně fyzikálních a mechanických charakteristik materiálu v čase.

Obvyklý postup pro omezení rizika náhlého nestabilního lomu komponent provozovaných zařízení je založen na tom, že zařízení je vystaveno provoznímu namáhání při teplotách vyšších než **FATT**, tedy teplotě, která charakterizuje přechod mezi tvárným a křehkým porušením. Jako příklad lze uvést přehřev rotorů parních turbín při jejich spouštění.

Lomová houževnatost materiálu určuje přípustnost defektů provozovaných zařízení. V řadě případů není lomová houževnatost materiálu známa, protože nebyla buď měřena vůbec, nebo není znám vliv provozních podmínek na lomové chování materiálu v průběhu dlouhodobého provozu na pracovní teplotě. Jako příklad lze uvést teplotní stárnutí nízkolegovaných ocelí rotorů parních turbín pracujících při zvýšených teplotách.

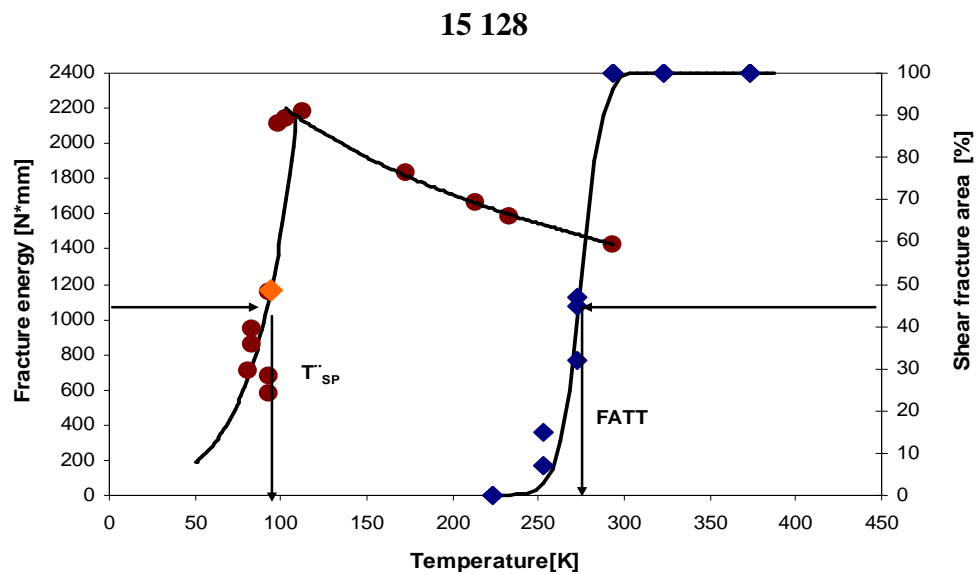
Použití standardizovaných postupů pro stanovení aktuálního lomového chování provozovaných komponent energetických zařízení může způsobit jejich značné poškození při odběru zkušebního materiálu a/nebo následných opravách prováděných nejčastěji svařováním. Potřebu velkého množství zkušebního materiálu, především pro stanovení lomové houževnatosti pomocí standardizovaných postupů lze eliminovat pomocí „nedestruktivního“, odběru malého množství zkušebního materiálu z povrchu součásti a stanovením

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

mechanických charakteristik pomocí *SP* testů. Dále jsou uvedeny postupy používané pro odhady *FATT* a lomové houževnatosti při laboratorní teplotě na základě *SP* testů zkušebních těles tvaru disku o průměru 8 mm a tloušťce 0,5 mm.

Odhad *FATT* na základě výsledků penetračních testů v rozmezí teplot – 196 až + 60 °C

Na základě výsledků zkoušek rázem v ohybu a výsledků penetračních testů v teplotním intervalu – 196 až + 60 °C bylo jednoznačně prokázáno, že u ocelí, u kterých teplotní závislost vrubové houževnatosti, stanovovaná na zkušebních tělesech Charpy s V vrubem, vykazuje tranzitní chování, lze pozorovat tranzitní chování rovněž u teplotní závislosti lomové energie penetračního testu (*obr. 32*) [34].



Obr. 32 Tranzitní chování Charpy vs. SP [34]

Tranzitní teplota *TSP* je definována jako teplota odpovídající polovině součtu maximální lomové energie a lomové energie 200 N·mm stanovené při penetračních testech.

V řadě prací [34, 35, 36] pak byla prokázána existence jednoduchého vztahu mezi tranzitní teplotou *TSP* (*Small Punch Ductile Brittle Transition Temperature*), stanovenou na základě výsledků penetračních testů, a *FATT*, stanovenou na základě rázových zkoušek v ohybu na zkušebních tělesech Charpy s V vrubem, ve tvaru $TSP = a \cdot FATT$. V literatuře je pro konstantu *a* uváděna hodnota $a = 0,35 \div 0,41$. Na základě výsledků zkoušek rázem v ohybu a

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

penetračních testů u 12 typů uhlíkových a nízkolegovaných ocelí s BCC mřížkou byla stanovena hodnota $a = 0,44$ ($r = 0,91$) [37].

Znalost teploty *FATT* může být využita rovněž k odhadu lomové houževnatosti materiálu pomocí empiricky stanovené závislosti K_{IC} vs. *T-FATT*. Tyto závislosti však vykazují pro danou skupinu materiálů poměrně velký rozptyl. Použití dolní obalové křivky empirické závislosti K_{IC} vs. *T FATT* pak může vést ke zbytečně konzervativnímu odhadu lomové houževnatosti.

Odhad lomové houževnatosti na základě výsledků penetračních testů

Výše uvedenou nevýhodu konzervativního odhadu lomové houževnatosti materiálu je možno eliminovat stanovením lomové houževnatosti z výsledků penetračních testů. Postupy stanovení lomové houževnatosti materiálu (J_{IC} a/nebo K_{IC}) jsou založeny na:

1. Empiricky stanovené závislosti mezi J_{IC} a ekvivalentní lomovou deformací ϵ_f pro houževnaté materiály, jejichž lomové chování je popisováno parametry elasto-plastické lomové mechaniky.
2. Empiricky stanovené závislosti mezi lomovou houževnatostí K_{IC} a lomovým napětím pro materiály křehké, jejichž lomové chování je popisováno parametry lineární lomové mechaniky.

S ohledem na skutečnost, že lomové chování konstrukčních ocelí používaných v energetickém strojírenství lze při laboratorní teplotě popsat parametry elasto-plastické lomové mechaniky, je hodnota J_{IC} korelována s lomovou deformací vzorku ϵ_f pomocí vztahu:

$$J_{IC} = K_{SP} \cdot \epsilon_f - J_0 \quad (20)$$

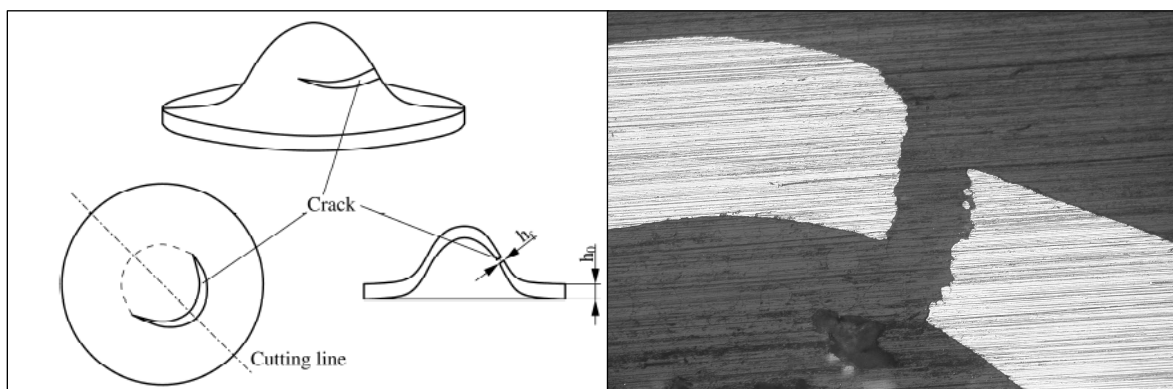
Pro nízkolegované oceli byla v práci prokázána nezávislost konstant K_{SP} a J_0 na materiálu a hodnoty $K_{SP} = 280$ N/mm a $J_0 = 50$ N/mm.

Pro stanovení efektivní lomové deformace vzorku ϵ_f je třeba změřit nejmenší tloušťku vzorku v místě iniciace trhliny (*obr. 33*). Pro zajištění dostatečné přesnosti je hodnota h_0 měřena na připraveném metalografickém výbrusu (*obr. 34*).

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

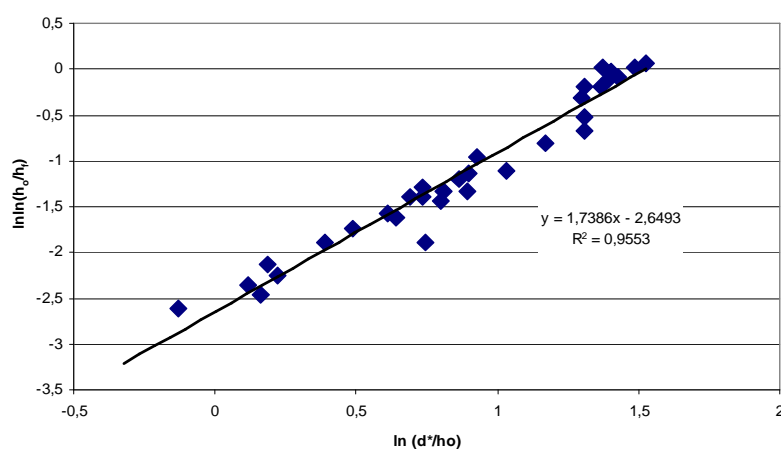
Efektivní lomová deformace ϵ_f může být rovněž přímo určena z hodnoty posunutí v okamžiku porušení d^* z empirického vztahu

$$\epsilon_f = \ln \frac{h_0}{h_f} = \beta \cdot \left(\frac{d^*}{h_0} \right)^x \quad (21)$$



Obr. 34 Postup při stanovení efektivní lomové deformace ϵ_f [38]

Obr. 33 Metalografický výbrus [34]



Obr. 35 Závislost mezi $\ln \ln(h_0/h_f)$ a $\ln(d^*/h_0)$ pro nízkolegovanou CrMoV ocel [23]

U uhlíkových a nízkolegovaných ocelí je možno stanovit na základě penetračních testů v rozmezí teplot -196 až $+60$ °C aktuální úroveň **FATT** a lomové houževnatosti, tedy materiálové charakteristiky nezbytné pro posuzování integrity, resp. zbytkové životnosti zařízení. Výhodou tohoto postupu je bezdeformační odběr zkušebního materiálu z povrchu posuzované součásti v průběhu odstávky bez nutnosti následných oprav [34, 37, 38].

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

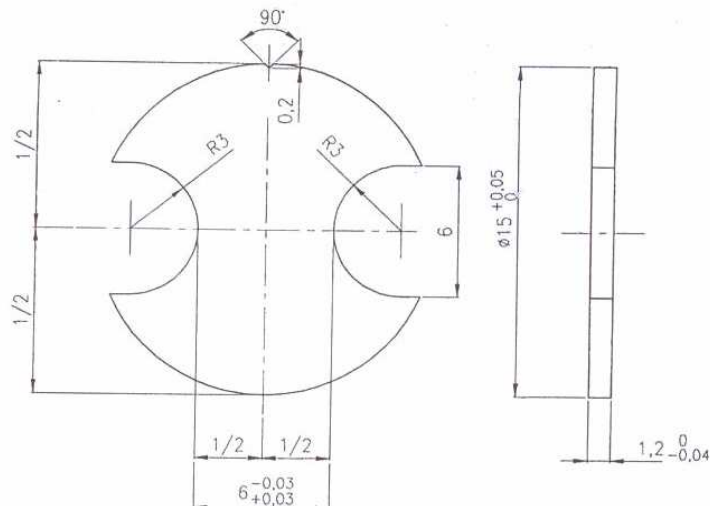
5.6. Stanovení únavových charakteristik

Na základě již předdefinovaného tvaru zkušebního tělesa (*obr. 36*) pro zkoušky únavy z odběrů Small Punch [27, 31], byly navrženy, vyrobeny a odzkoušeny funkční mechanické čelisti (*obr. 37*) pro upínání těchto těles, tzv. mini vzorků. Jejich konstrukce umožňuje snadné a rychlé upnutí mini vzorků.

Čelisti jsou používány na zkušebním vysokofrekvenčním magneto-resonančním stroji Zwick Roell-Amsler (*obr. 39*). Maximální kapacita stroje je 10kN.

Dále byly mini-vzorky připraveny z klasických tyčí. Nejprve soustruženy na patřičný průměr 15mm, poté byly vyhotoveny drážky. Vzájemné porovnání jednotlivých způsobů výroby na výsledky zkoušek únavy bude též ukázáno a zhodnoceno v praktické části práce.

Pro detailnější rozbor vlivu zaoblení vzorků byly vytvořeny **MKP** modely s různou hustotou sítě. Koncentrátor napětí v rádiusech vzorků byl stanoven na 1,33 oproti klasickým zkušebním tělesům (*obr. 38*).

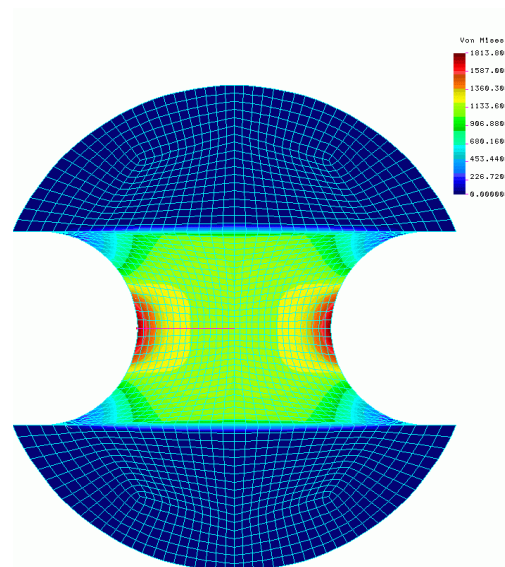


Obr. 36 Návrh zkušebního tělesa pro zkoušky únavy z odebraného materiálu [27]

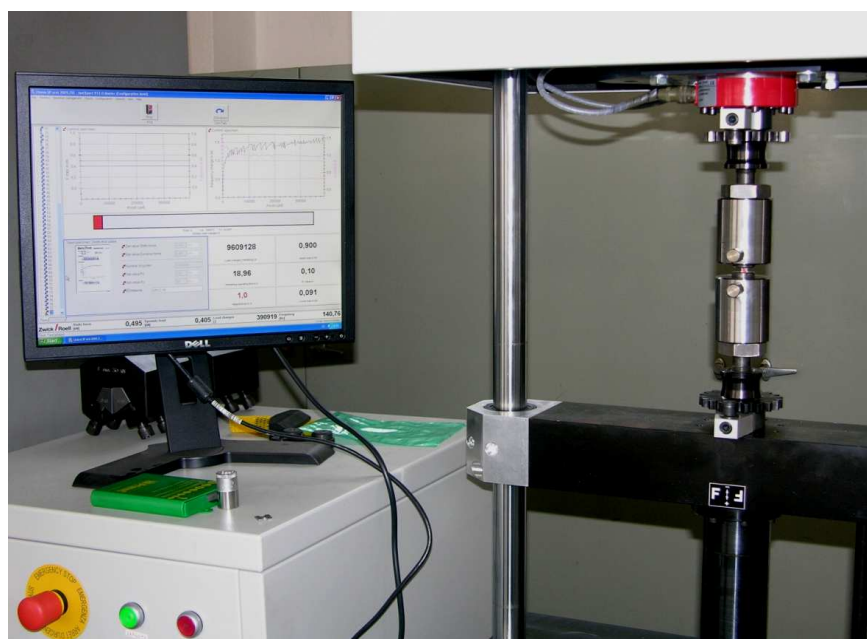
Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise



Obr. 37 Čelisti pro zkoušení únavových testů [39]



Obr. 38 MKP model únavového vzorku [62]



Obr. 39 Zkušební stroj

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

5.7. SP test na úrovni mezinárodní spolupráce

SP testování miniaturizovaných vzorků je omezeno nejen skutečností, že standardní procedura neexistuje, ale optimalizace testu není dokonce ani dostatečně rozvinuta. Rozvoj těchto nových technik by mohl být možný pro průmyslové organizace. Avšak náklady na vytváření dostatečných podkladových dat a na předložení důkazů pro přesvědčení klientů k používání této technologie v jejich podniku, by převážily nad komerční výhodou. Zahrnutí této technologie do evropských norem, by taktéž požadovala podporu společností v mnoha zemích a vývoj této techniky by nepřinesl žádné výhody žádné jednotlivé zemi. Je tedy nepravděpodobné, že by užitek této technologie byl realizován v rámci národního výzkumného programu. Přijetí a tudíž i použití vyvinutých kódů postupů (Codes of Practice) evropským průmyslem může být nejlépe usnadněno aktivitami evropské spolupráce.

Projekt mezinárodní spolupráce CIK (Contribution in Kind project):

Hlavní schéma spolupráce:

- University of Wales, Swansea poskytla materiál a jednoosá data,
- CESI udělala koordinaci a vytvořila/aktualizovala testovací matici,
- JRC Petten shromáždil a ohodnotil data creep rupture,
- CESI, JRC, UWS a Cracow University provedly SP testy,
- KEMA v současnosti produkuje speciální zprávu o aspektech creepového modelování (zvláště prozkoumává možný původ creep parametrů jako je Nortonův koeficient a další).

Nicméně vynikající vlastností této experimentální technologie je možnost šetrného odběru vzorků materiálu a měření mechanických charakteristik konstrukčních materiálů během provozních odstávek zařízení, namísto spoléhání se na předpokládané charakteristiky měřené na novém materiálu [25].

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

5.8. SP test na úrovni ČR

V České republice je v současné době jediným dodavatelem kompletních služeb v oblasti odběrů vzorků **SP**, včetně vyhodnocení mechanických vlastností společnost MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o. Od roku 2006 se **SP** testy zabýváme ve VZÚ Plzeň s.r.o. Další společností, která by v budoucnu ráda nabídla své služby v této oblasti je COMTES FHT a.s..

6. Metoda akustické emise

6.1. Akustická emise – fyzikální jev a měřicí metoda

Pojem „akustická emise“ se objevil ve fyzikálních laboratořích při studiu plastické deformace kovů. Byl tak nazván fyzikální jev, při kterém plastickou deformaci kovů doprovází akustické popraskávání či akustický šum emitovaný uvnitř materiálu v průběhu plastické deformace. Cílem detekce těchto šumů a popraskávání bylo získat nové doplňující informace o procesech, o přítomnosti a charakteru procesů, které jsou jejich zdrojem, o plastické deformaci.

S akustickou emisí se setkal již každý, i když jí tak nenazýval, např. popraskávání suché větve před zlomením. Toto popraskávání zná každý. Je slyšitelné prostým uchem. Dynamické poprasknutí se v tomto případě přenáší z větve do vzduchu a následně se šíří jako tlakové vlny vzduchem k uchu. Mnohem citlivěji lze však poprasknutí ve větvi detekovat díky vlnám, které se od místa „poprasknutí“ šíří přímo tělesem – větví. I zde se od zdroje šíří tělesem elastické napěťové vlny. K jejich detekci a vyhodnocení je však již nezbytné patřičné přístrojové vybavení. Toto přístrojové vybavení umožnilo vznik experimentální metody akustické emise.

Dle názvosloví EN 13390 *akustickou emisí (AE)* nazýváme elastické napěťové vlny generované dynamickým uvolněním mechanického napětí uvnitř materiálu tělesa nebo procesem působícím vznik elastických napěťových vln na povrchu tělesa (např. klepnutí).

Metodou *AE* nazýváme metodu detekce akustické emise, následné elektronické zpracování detekovaného signálu *AE* a konečně též vyhodnocení parametrů detekovaného signálu *AE*. První systematické práce v této oblasti jsou datovány do 50tých let 20tého století a jsou spojeny se jménem německého fyzika Josepha Kaisera. Přibližně od 60tých let dvacátého století se tato metoda začíná aplikovat v praxi pro monitorování a detekci celé řady dalších procesů, jež iniciují vznik *AE* šířící se tělesem. Nejedná se již pouze o detekci *AE* vyvolané plastickou deformací kovů, ale též o monitorování a identifikaci celé řady jiných procesů, jako porušování materiálů konstrukcí, netěsností a úniků medií pod tlakem, tření, obrábění, sváření, výrobních a technologických procesů [40].

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

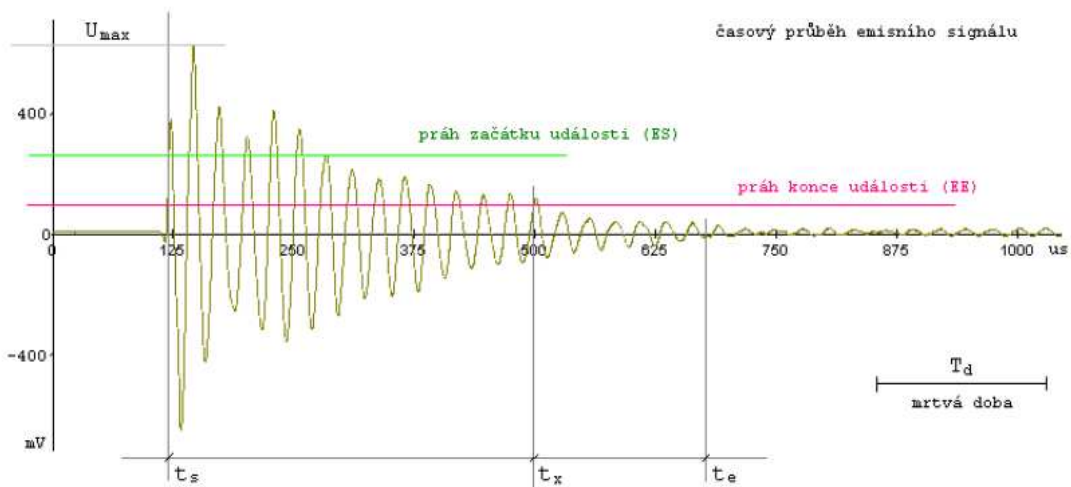
Akustická emise je fyzikální jev, při kterém v určitých lokalitách materiálu dochází v důsledku dynamických procesů vyvolaných vnějšími nebo vnitřními sílami k uvolňování části materiálem nahromaděné elastické energie (např. při vzniku a šíření trhliny). Uvolněná energie se v přilehlém okolí místa uvolnění transformuje na **napět'ový impuls**, který se šíří materiálem ve formě přechodových elastických vln a při dosažení povrchu materiálu se transformuje na takový mód vlnění, který odpovídá geometrické konfiguraci a rozměrům objektu. Složka vlnění kolmá k povrchu materiálu pak může být detekována piezoelektrickými snímači akustické emise, které jsou zde uchyceny pomocí magnetických držáku nebo prostřednictvím vlnovodů. Akustický signál ze snímače je po zesílení přiveden na vstup měřicího systému, kde je po opětovném zesílení vyhodnocován. Jednorázový dynamický proces, v důsledku kterého se rychle uvolní určité množství energie se nazývá **emisní událost**, lokální proces, který emisní události produkuje se nazývá **emisní zdroj**. Elektrický signál na výstupu snímače se nazývá emisní signál.

Metoda měření **AE** je vhodná zejména pro diagnostiku vzniku a rozvoje vad materiálu, za podmínek mechanické, tepelné nebo korozní stimulace. Úspěšně se používá například při tlakových zkouškách potrubních systému nebo nádob, kdy jsou pomocí zkušebního přetlaku dosaženy podmínky mechanické stimulace. Analýzou parametrů a četnosti registrovaných emisních událostí je pak možné usuzovat na přítomnost nebo nepřítomnost aktivních defektů v konstrukci. Další oblastí využití **AE** je kontinuální provozní monitorování takových zařízení, u kterých se v důsledku neustálého namáhání lze předpokládat výskyt různých defektů (např. monitorování netěsností tlakových systému, sledování opotřebování nástrojů a součástí strojů, apod.). V těchto případech vychází indikace vzniklé vady z analýzy dlouhodobých trendů provozního šumu a parametru emisních událostí převyšujících běžné šumové pozadí.

Velkou výhodou metody **AE** je to, že indikuje pouze takové defekty, které jsou při daném namáhání zařízení aktivní a jsou tedy nestabilní a nebezpečné. Na rozdíl od běžných diagnostických metod také poskytuje globální informaci o stavu kontrolovaného objektu. Na základě výsledků měření **AE** totiž lze detailní defektoskopické kontroly přednostně směřovat do míst detekovaných emisních zdrojů. Metoda **AE** se takto stává užitečným doplňkem běžných metod diagnostiky.

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

Signál **AE** má buď charakter spojitého šumu, kdy jeho amplituda po delší dobu neklesá pod určitou prahovou úroveň, nebo je nespojitá a signál má charakter časově oddělených pulsů - emisních událostí. Zdrojem **spojité AE** jsou mikromechanismy v procesu plastické deformace materiálu, technologické šумы při provozu zařízení, resp. vlnění emitované při úniku média z tlakových systémů. Zdrojem **nespojité (praskavé) AE** jsou především procesy probíhající při vzniku a rozvoji trhlin a korozní jevy, spojené s impulsním uvolňováním elastické energie. Typický časový průběh nespojitého emisního signálu je zobrazen na (**obr. 40**).



Obr. 40 Časový průběh emisního signálu [41]

V případě **spojité AE** většinou hodnotíme střední **kvadratickou úroveň detekovaného signálu - RMS** a počty překmitů přes několik prahových úrovní za stanovený časový interval. Systém Daemon vyhodnocuje **RMS** a počty překmitů přes dvě prahové úrovně Count1 a Count2. Časový interval pro jejich počítání je nastavitelný.

Při **nespojité AE** hodnotíme každou emisní událost zvlášť. Pro charakteristiku jednotlivých oddělených událostí se nejčastěji používají následující parametry obr. 40: **čas začátku události** t_s , kdy detekujeme první překmit signálu přes **prahovou úroveň ES**. S pomocí časového parametru nazvaného **mrtvá doba T_d** můžeme definovat čas konce události a tím i délku události takto: **Konec události** je okamžik, kdy se alespoň po dobu **T_d** neobjeví překmit signálu přes **práh EE**. **Délka události** je doba $t_e - t_s$. Událost je také možné popsat dalšími parametry jako např. **maximální amplitudou signálu v době trvání události U_{max}** , časem, kdy je tohoto maxima dosaženo (risetime) a nebo počtem **překmitů přes prahové úrovně Count1 a Count2** opět v rámci dané události. Všechny popsané parametry kromě

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

risetime jsou vyhodnocovány systémem XEDO – Daemon, který bude blíže popsán v praktické části práce [41].

Přenosová trasa *AE* od zdroje k vyhodnocení parametrů signálu *AE*

Celý proces vzniku, detekce a vyhodnocení *AE* můžeme rozdělit na několik fází:

- a) Událost zdroje *AE*, zdroj *AE*, mechanismus zdroje *AE*
- b) Šíření napěťových vln – akustické emise od zdroje k místu detekce snímačem *AE*
- c) Detekce napěťových vln snímačem *AE* na povrchu tělesa – tzn. transformace *AE* na povrchu tělesa v místě snímače na elektrický signál *AE*
- d) Analogové zpracování a vedení elektrického signálu *AE* na vstup vyhodnocení signálu
- e) Vyhodnocení výsledného elektrického signálu *AE* měřícím systémem *AE*

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

6.1.1. Časová a frekvenční reprezentace AE. Frekvenční pásmo měření AE

Základními časovými charakteristikami **AE** je spojitost či praskavost signálu, délka trvání hitu, tzn. je-li hit **AE** ostrý či v čase dlouhý, další charakteristikou bývá doba náběhu signálu hitu do maxima a podobně, tzn. parametry odvozené od časového zobrazení signálu **AE**.

Typické zdroje **AE** vytvářejí frekvenčně širokopásmový signál **AE**, nikoliv „úzkopásmové tóny“. Při sledu pulsů **AE** bude mít výsledný signál stejné širokopásmové spektrum jako jednorázový puls, pokud posloupnost pulsů bude časově náhodná bez jakékoliv periodicity či synchronizace pulsů.

Parametry naměřeného signálu **AE** odvozujeme obvykle z časového průběhu signálu **AE**. Detailní frekvenční analýza je předmětem tzv. „pokročilého vyhodnocení“ signálu **AE**. Přesto existuje jedna zásadní úloha související s frekvenčním obsahem vln **AE** šířících se od zdroje ke snímači **AE**, a tou je správná volba frekvenčního pásma měření **AE**.

Lidské ucho je schopno zaznamenat zvuky v pásmu cca od 15 až 20 Hz do cca 15 až 20 kHz. V metodě **AE** lze volbou snímače a filtrace signálu frekvenční pásmo detekce **AE** vybrat. Za **typické frekvenční pásmo detekce AE se obvykle uvádí 20 kHz až 1 MHz**. **AE** lze ve speciálních případech měřit i na nižších či vyšších frekvencích. **AE** však obvykle neměříme v celém širokém pásmu 20 kHz až 1 MHz ale v užším vybraném frekvenčním „podpásmu“.

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

Vymezení metody AE vůči typickým NDT metodám

Typické **NDT** metody charakterizují stav – výskyt porušení či defektu. Pracují s cílem vhodného „zviditelnění“ přítomnosti defektu v materiálu konstrukce. Přítomnost defektu se projeví změnou intenzity záření, v šíření a odrazech UZ vln, změnou toku vířivých proudů, ve zviditelnění defektu penetrační kapalinou. Typické **NDT** metody vyhledávají přítomnost a charakterizují velikost, resp. orientaci defektů.

Metoda **AE** detekuje a charakterizuje rozvoj procesu. Pracuje s cílem „odposlechu“ akustické aktivity emitované procesy probíhajícími v materiálu (plastické deformace, iniciace a rozvoje porušení, svírání a rozevírání trhlin, únik média přes průchozí trhlinu). Metoda **AE** detekuje, lokalizuje a hodnotí aktivitu porušení a defektů právě a pouze v jejich průběhu.

Metoda **AE** není universální. Efektivnost a přínos nasazení metody **AE** závisí výrazněji než u typických **NDT** metod na typu konstrukce, materiálu, režimu nasazení, na historii provozu a zatížení, na tom jaké mechanismy a procesy předpokládáme při zkoušce detekovat, v jakém režimu zatížení či provozu **AE** měříme, na podmínkách rušení, atd..

6.2. Základní typy zdrojů AE a jejich charakteristiky

6.2.1. Pen Test – základní kalibrační zdroj – „pevný bod AE“

Pen Test představuje základní zdroj *AE*, se kterým se každý v oboru *AE* setkává. Pen Test reprezentuje náhlé skokové odlehčení síly kolmo tlačící na povrch desky. Základní pozitivní vlastnosti Pen Testu je uvolnění relativně velké energie ve formě *AE* v podobě ostrého pulsu časového trvání řádově méně než 10-2 μ s. Tzn. Pen Test generuje ostrý puls *AE* se všemi frekvencemi zastoupenými rovnoměrně do cca desítek MHz.

Pen Test či lom kapiláry, skokové odlehčení axiální síly (kolmé k povrchu) jsou využívány ke kalibraci, a to jak k relativní kalibraci snímačů na konstrukci či tělese, tak k absolutní kalibraci snímačů.

6.2.2. Jednorázový poskok defektu v materiálu – „energie prasknutí“

Původním fyzikálním zdrojem označovaným jako akustická emise je uvolnění mechanické energie a napětí v důsledku rychlého posuvu („poskoku“) defektu uvnitř zatěžovaného materiálu. Tímto poskokem mohou být:

- odtržení dislokace od překážky či vytržení dislokace z atmosféry příměsových prvků
- proražení překážky či vznik mikrotrhliny nahromaděním dislokací typu „pile-up“
- vznik křehké mikrotrhliny, dekoheze či lom nekovových složek materiálu
- protržení můstků mezi trhlinou a mikrotrhlinou či poskok trhliny

6.2.3. Faktory ovlivňující detekovatelnost AE při porušování materiálu

Rychlejší poskok defektu (křehčí) vyzařuje úměrně vyšší inenzitu *AE* oproti poskoku pomalému (houževnatějšímu). Nadto rychlejší „poskok“ vyzařuje *AE* též ve vyšších frekvencích spolehlivě na úrovni stovek kHz a jednotek MHz. Naopak u pomalejších mechanismů (houževnatých) vedle toho, že emitují menší část energie ve formě *AE* bývá tato energie soustředěna do nižších frekvencí desítek až jednotek kHz. Detekce houževnatých mechanismů porušení bývá na vyšších frekvencích omezená. Vliv rychlosti, tzn. křehkosti vers. houževnatosti mechanismu porušení též vysvětluje obvykle v literatuře uváděné dva

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

sloupce faktorů posilujících/oslabujících intenzitu AE . Obecně platí, že faktory posilující houževnatost odezvy materiálu na zatížení oslabují intenzitu AE a naopak faktory oslabující houževnatost odezvy materiálu na zatížení posilují intenzitu AE .

6.2.4. Základní mechanismy AE při deformaci a porušování materiálu

Tak jako existuje široké spektrum nejrůznějších materiálů, tak existuje široké spektrum nejrůznějších mechanismů porušení. Není možné a ani účelné popisovat zde tyto mechanismy ani co do rozsahu ani co do hloubky. Uvedme proto pouze vybrané základní informace.

Při porušování kovových materiálů se setkáváme s následnými mechanismy iniciace porušení v izolovaných mikrotrhlinách či růstu porušení na čele trhliny:

Houževnatý lom – iniciace dutin na vměstcích či precipitátech, následovaná plastickým růstem dutin a jejich propojováním – protrháváním můstků.

Smykový lom – kdy dochází k lokalizaci porušení ve smykových pásech výrazné plastické deformace. Podél těchto pásů dochází k porušení smykem.

Křehký lom – porušení vzniká náhle dynamickým lomem s minimální plastickou deformací před lomem. I křehké kovové materiály nejsou obvykle tak křehké, že by docházelo k náhlému lomu tělesa bez předchozího vzniku lokálních mikrotrhlin v nejslabších místech materiálu, proto i křehkému lomu předchází iniciace křehkých mikrotrhlin a tím detekce AE .

Při plastické deformaci kovových materiálů probíhá deformace díky pohybu dislokací, který není spojitý a je doprovázen řadou mikroposkoků. Jednotlivé mikroposkoky dislokací jsou však několik řádů pod prahem detekovatelnosti AE . Při plastické deformaci však dochází k ohromnému množství poskoků dislokací současně. Poskoky uvolňují velké množství „malých“ kvant energie AE , jež se sčítají, superponují a vytvářejí akustický šum spojitě AE . To vysvětluje, proč je v tomto případě intenzita AE úměrná objemu plasticky deformovaného materiálu a rychlosti deformaci (četnosti – výkonu popraskávání – poskoků dislokací).

6.2.5. Další faktory a zdroje AE doprovázející deformaci a porušení materiálů

Plastickou deformaci resp. porušení materiálu doprovází ohromné množství dynamických mikroposkoků defektů v materiálu jež emitují (vyzařují) **AE**. Bohužel převážná většina těchto mechanismů (událostí **AE**) zůstává pod hranicí detekovatelnosti současného přístrojového vybavení. A to platí jak v laboratorních podmínkách, tak samozřejmě o to více v podmínkách průmyslových aplikací metody **AE**. Z pohledu mikrostruktury materiálu „rozměrů mikrometrů“ detekuje **AE** pouze rozsáhlejší děje na úrovni rozměrů desítek až stovek μm . Můžeme s nadsázkou napsat, že detekujeme pouze špičku ledovce těchto procesů.

Uvažujme monitorování **AE** při postupném růstu trhliny např. při vodíkovém praskání a podívejme se na lomovou plochu. Tam lze odhadnout počet lomových fazet (plošek) např. na řádově desítky tisíc fazet na plochu 1 mm^2 . Ovšem při růstu trhliny jsou detekovány pouze jednotky maximálně desítky události **AE** na 1 mm^2 . Jak bylo dokázáno, za intenzivnější detekovatelné události **AE** zodpovídají poskoky, kdy dojde náhle k souběžnému poskoku, k lavině poskoků několika jednotek až desítek lomových fazet současně.

Dalším významným faktorem posilujícím, energii, intenzitu a detekovatelnost události **AE** je tzv. zesilující faktor trhliny. Tento faktor spočívá v tom, že stejný mechanismus události **AE** na čele trhliny je zdrojem **AE** až o řád či dokonce dva řády silnější, než v případě stejného mechanismu při zatížení mimo čelo trhliny [40, 41].

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

7. Experimentální část

7.1. Small Punch test

7.1.1. Příprava vzorků pro SP test-penetrační testy

Vlastnímu provedení small punch testu předchází fáze nejdůležitější a zároveň nejnáročnější – fáze přípravy vzorků. V případě SP se totiž pro další vyhodnocení používají pouze absolutní hodnoty (síla, deformace) a ne hodnoty přepočítané (např. napětí, poměrná deformace) a tudíž rozměry vzorků musí být ve velmi úzkém tolerančním intervalu.

Zkoušené materiály

Ve společnosti Výzkumný a zkušební ústav s.r.o., dříve ŠKODA Výzkum s.r.o., Mechanická zkušebna, která moji bakalářskou, diplomovou a následně dizertační práci zastřešovala, byly vyrobeny zkušební polotovary (tyčinek) o průměru 8 mm a libovolné délky (*obr. 41*).



Obr. 41 Polotovary, [69]

Označení zkoušených materiálů

P92	
P91	X12Cr13
16537	ocel 6
X14CrMoVNbN10-2	ocel 7
22CrMoNiWV8-8	ocel 8

Fáze přípravy vzorků (bakalářská, diplomová práce)

Pro účely dosažení spolehlivých výsledků SP testu bylo třeba vyrobit 5 až 6 vzorků z každého materiálu. Požadovaná tloušťka vzorku byla $0,5 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$. Příprava výroby vzorků se skládala z následujících fází:

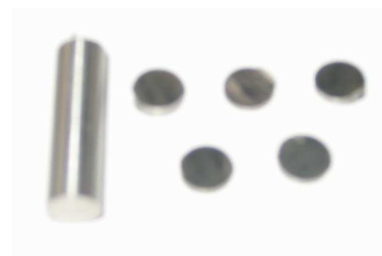
Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

1. Řezání

Po upnutí polotovaru do svěráku řezací pily MICRON 3000 (*obr. 42*), byla za pomoci posuvného měřítka nastavena potřebná vzdálenost pro dosažení tloušťky 1,3 – 1,6 mm (*obr. 43*). Po celou dobu řezání byly nastaveny optimální otáčky 3000/min. a materiál byl neustále chlazen z důvodu zamezení tepelného ovlivnění vzorku.



Obr. 42 Řezací pila MICRON 3000 [69]



Obr. 43 Nařezané vzorky

2. Broušení vzorků nahrubo

Aby byla dosažena požadovaná přesnost při výrobě vzorků, bylo nezbytné navrhnout a vyrobit speciální přípravek pro broušení vzorků (*obr. 44*). Za pomoci tohoto přípravku byly vzorky zbroušeny na stroji Struers LaboPol-5 (*obr. 45*), na tloušťku 0,54 – 0,56 mm. Tato hodnota byla nastavena na mikrometru, který je součástí přípravku pro broušení. Použit byl diamantový brusný kotouč Allegro, taktéž od firmy Struers. Broušení probíhalo při 200 ot./min. za neustálého chlazení vodou.

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise



Obr. 44 Přípravek pro broušení vzorků [69]



Obr. 45 Brusný stroj [69]

3. Konečné opracování

Po dosažení rozměrů 0,54 – 0,56 mm byl brusný kotouč Allegro vyměněn za kotouč typu Piano 120, na který byla nanесena brusná diamantová pasta – 9 μm . Chlazení vodou bylo v tomto případě nahrazeno chladicí kapalinou určenou pro jemné broušení a diamantové leštění. Tato kapalina byla umístěna v přídatné nádobě, která je součástí brusného stroje. Dávkování kapaliny bylo následující: 1 kapka za 1 vteřinu. Vzorky bylo třeba často přeměřovat digitálním mikrometrem (*obr. 47*), aby nedošlo k jejich podbroušení. Před každým měřením bylo nutno 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 bylo dosaženo požadované přesnosti, tzn. 0,495 – 0,505 mm.



Obr. 47 Konečná podoba vzorků před SP testem



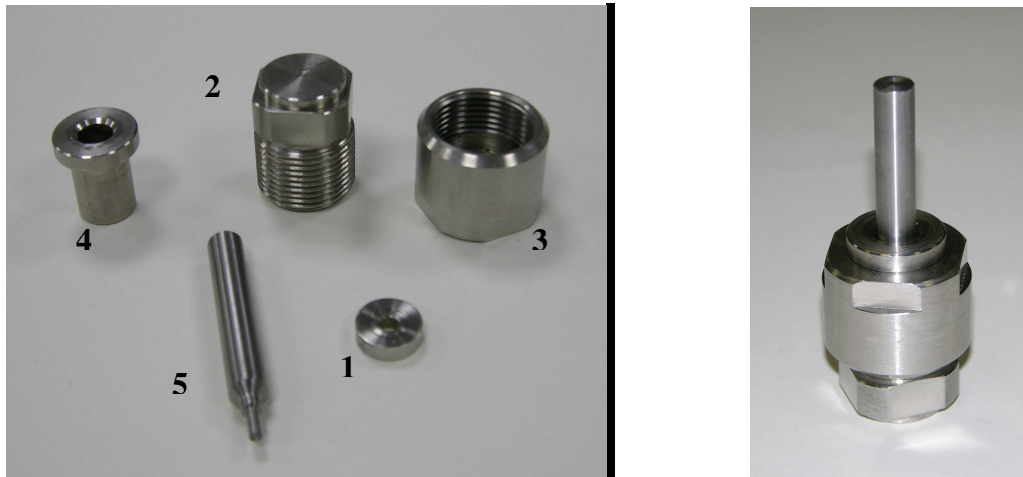
Obr. 46 Měřený vzorek v mikrometru s ideální tloušťkou [69]

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

První vzorky byly vyrobeny v Ústavu termomechaniky Akademie věd ČR ve Veleslavínově ulici v Plzni. Doba přípravy jednoho vzorku byla přibližně 60 – 90 minut.

7.1.2. Provedení zkoušky SP test

Vzorky byly zkoušeny v mechanické zkušebně VZÚ Plzeň s.r.o. Zkoušky byly provedeny na univerzálním zkušebním zařízení Zwick – Z250. Vzhledem k poslednímu vývoji v oblasti metodiky zkoušení SP, kdy je tato metodika ve fázi návrhu evropského standardu, byl navržen přípravek pokud možno kompatibilní s očekávaným přípravkem doporučeným navrhovanou normou. Za tímto účelem byla kontaktována pracoviště zabývající se přípravou této normy a na základě diskusí a návštěv těchto pracovišť odborníky z VZÚ Plzeň s.r.o. byl navržen přípravek modifikovaný pro podmínky zkušebních laboratoří VZÚ Plzeň s.r.o. (*obr. 48 a), b*). Přípravek byl vyroben nejprve jako prototyp v dílně mechanické zkušebny a po jeho ověření byly vyrobeny další přípravky, jejichž větší počet umožní získání většího množství dat v kratším časovém intervalu zejména v případě creepových zkoušek.



Obr. 48 a) SP test přípravek rozložený [69] b) SP test přípravek složený [69]

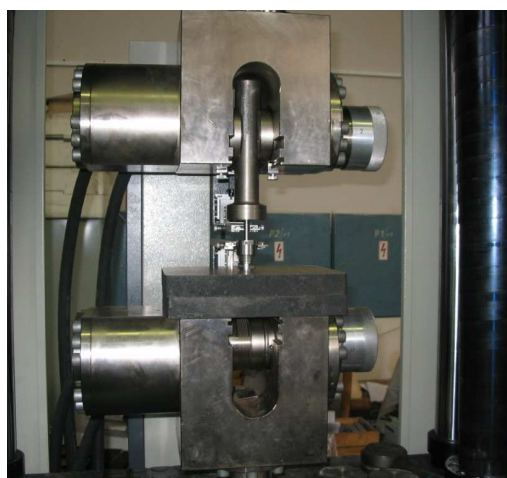
Vzorek se umístí na speciální podložku (lisovnici - 1) a společně s ní je vložen do spodní části přípravku (pouzdra - 2). Poté se horním otvorem spodní části přípravku (2) vloží lisovník (4). Ten zajistí „dosednutí“ lisovnice se vzorkem na dno spodní části přípravku a zároveň poslouží k vložení keramické kuličky vyrobené z materiálu na bázi Al_2O_3 , TC, Si_3N_4 o průměru 2,5mm. Ta se díky zužujícímu se průměru lisovníku ocitá přesně na středu vzorku. Část 2 je

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

spojena šroubovým spojem s částí 3 (matice). Kompletní přípravek je uzavřen částí 5 (děrovač). Tuto proceduru je nutno opakovat pro každý vzorek zvlášť.

Vlastní zkoušení

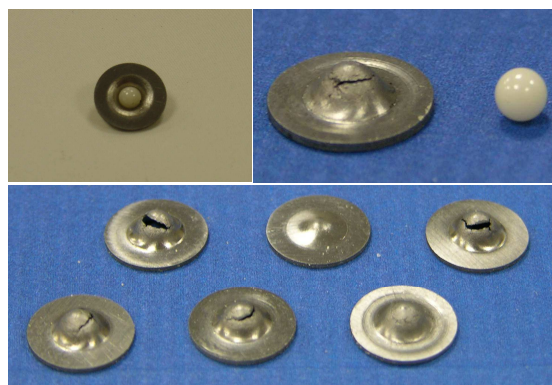
Přípravek se umístí na spodní příčnicku zkušebního stroje Zwick Z250 (*obr. 49 a), b*). V softwaru stroje Zwick - Z250 se nastaví vhodné parametry nutné k uskutečnění testu.



Obr. 49 a) celkové uspořádání zkoušky [69]

b) detail zkoušky [69]

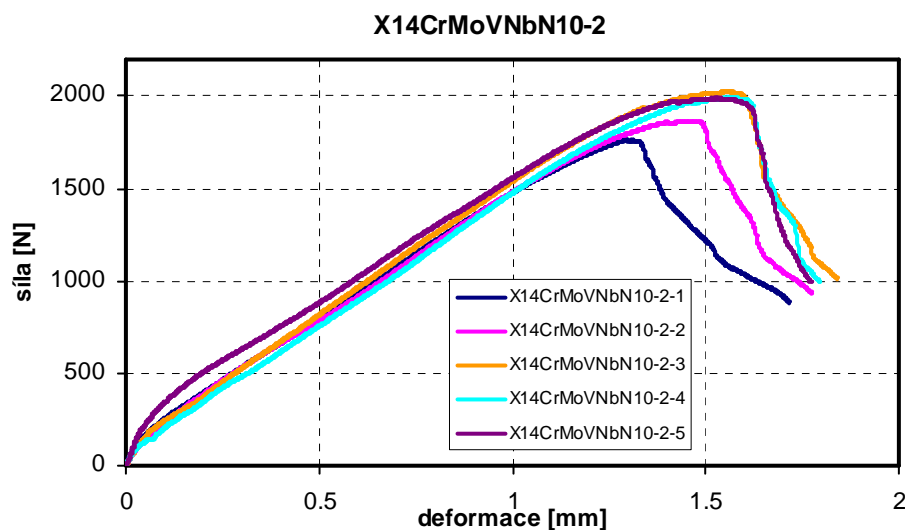
Po spuštění stroje se spodní příčnicka pohybuje konstantní rychlostí 0,5 mm/min. Předběžné zatížení vzorku je 10 N. Deformace vzorku je měřena snímačem Multisens. Průměr zkušební keramické kuličky je 2,5 mm (*obr. 50*). Naměřené záznamy jsou zobrazeny na *obr. 51 – 59* a naměřené hodnoty jsou uvedeny v *tab. 1 – tab. 8*.



Obr. 50 Vzorek a kulička, vzorky po provedení SP testu [69]

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

7.1.3. Experimentální výsledky zkoušek Small Punch

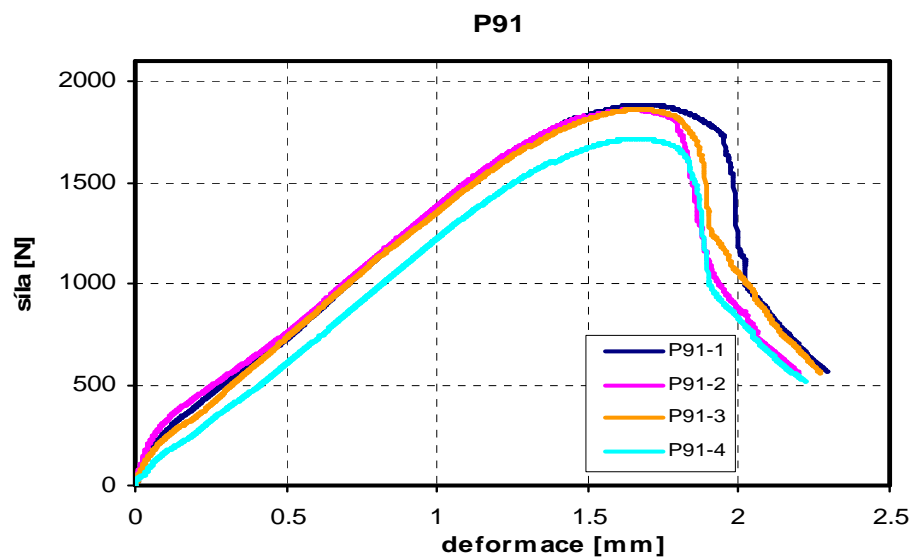


Obr. 51 Záznam zkoušek SP pro ocel – X14CrMoVNbN10-2 [69]

Tab. 1 Naměřené hodnoty pro vzorky z ocele X14CrMoVNbN10-2 [69]

Označení vzorku	Tloušťka vzorku [mm]	F_{\max} [N]	Max Deformace [mm]
X14CrMoVNbN10-2-1	0,497	1767	1,715
X14CrMoVNbN10-2-2	0,502	1868	1,774
X14CrMoVNbN10-2-3	0,501	2023	1,839
X14CrMoVNbN10-2-4	0,500	1992	1,795
X14CrMoVNbN10-2-5	0,498	1990	1,771

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

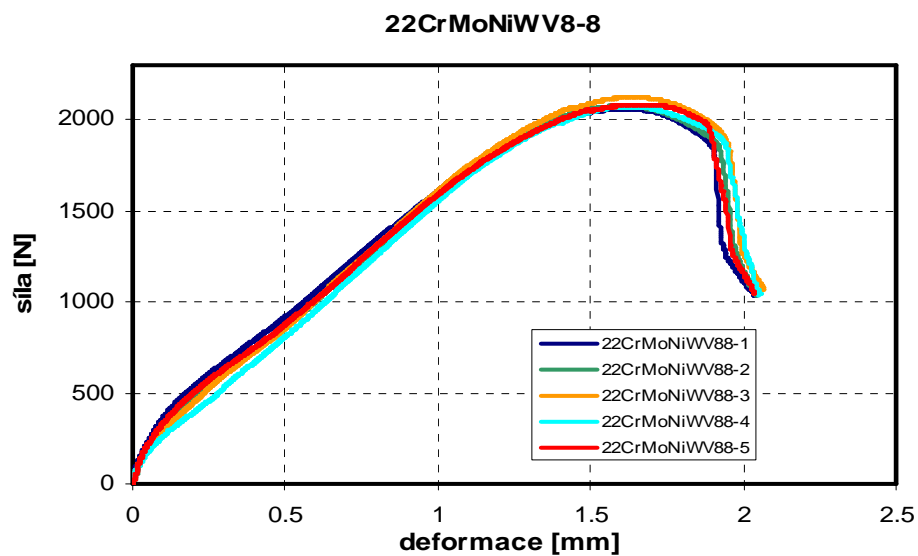


Obr. 52 Záznam zkoušek SP test pro ocel – P91 [69]

Tab. 2 Naměřené hodnoty pro vzorky z ocele P91 [69]

Označení vzorku	Tloušťka vzorku [mm]	F_{\max} [N]	Max Deformace [mm]
P91-1	0,501	1885	2,289
P91-2	0,500	1862	2,197
P91-3	0,501	1864	2,270
P91-4	0,475	1716	2,221

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

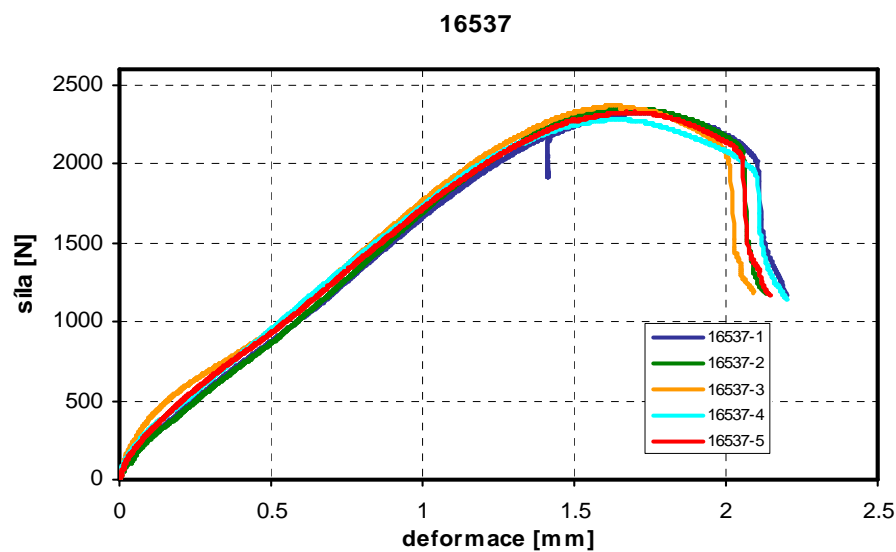


Obr. 53 Záznam zkoušek SP test pro ocel - 22CrMoNiWV8-8 [69]

Tab. 3 Naměřené hodnoty pro vzorky z ocele
22CrMoNiWV8-8 [69]

Označení vzorku	Tloušťka vzorku [mm]	F_{\max} [N]	Max Deformace [mm]
22CrMoNiWV88-1	0,505	2063	2,039
22CrMoNiWV88-2	0,502	2077	2,041
22CrMoNiWV88-3	0,504	2125	2,063
22CrMoNiWV88-4	0,503	2075	2,053
22CrMoNiWV88-5	0,505	2085	2,036

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

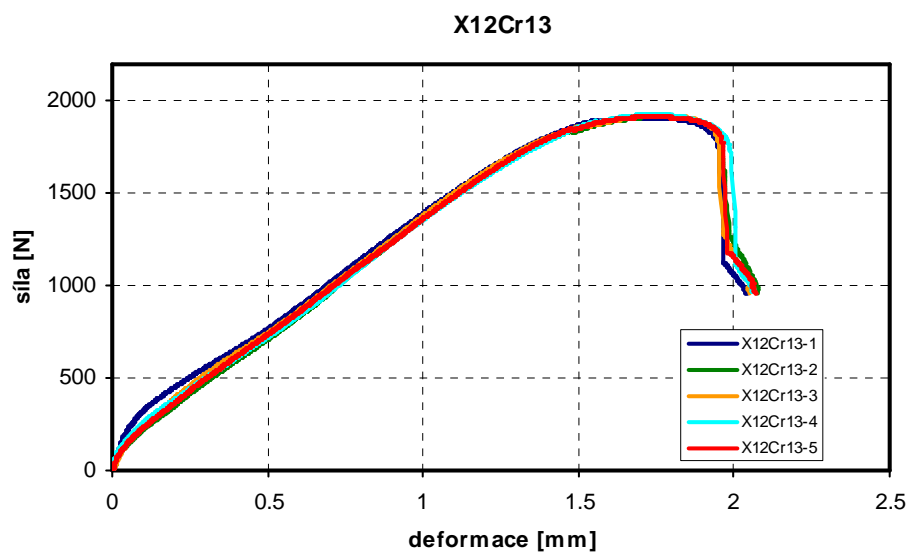


Obr. 54 Záznam zkoušek SP test pro ocel - 16537 [69]

Tab. 4 Naměřené hodnoty pro vzorky z ocele 16537 [69]

Označení vzorku	Tloušťka vzorku [mm]	F_{\max} [N]	Max Deformace [mm]
16537-1	0,503	2323	2,198
16537-2	0,505	2354	2,134
16537-3	0,504	2372	2,092
16537-4	0,507	2280	2,198
16537-5	0,505	2328	2,143

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

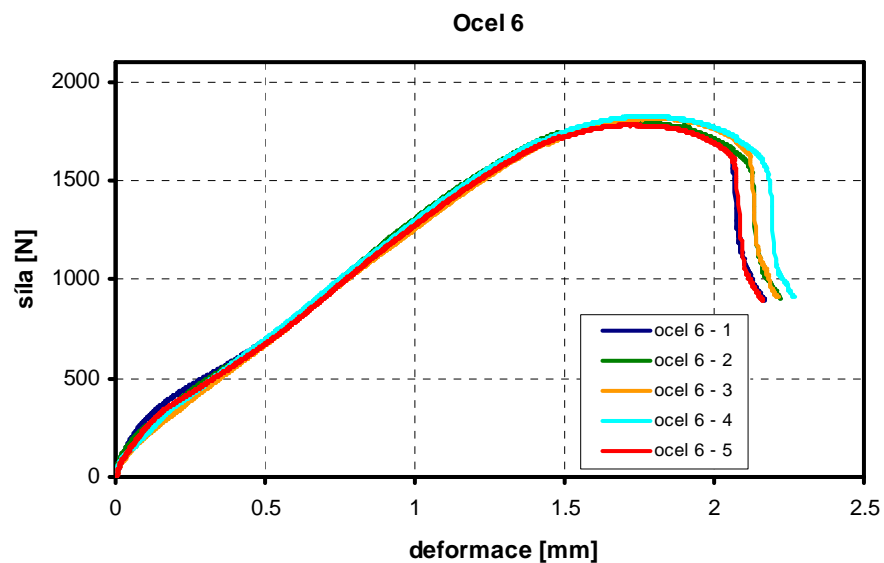


Obr. 55 Záznam zkoušek SP test pro ocel - X12Cr13 [69]

Tab. 5 Naměřené hodnoty pro vzorky z ocele X12Cr13 [69]

Označení vzorku	Tloušťka vzorku [mm]	F_{\max} [N]	Max Deformace [mm]
X12Cr13-1	0,503	1913	2,036
X12Cr13-2	0,503	1917	2,079
X12Cr13-3	0,503	1925	2,052
X12Cr13-4	0,498	1928	2,055
X12Cr13-5	0,499	1915	2,069

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

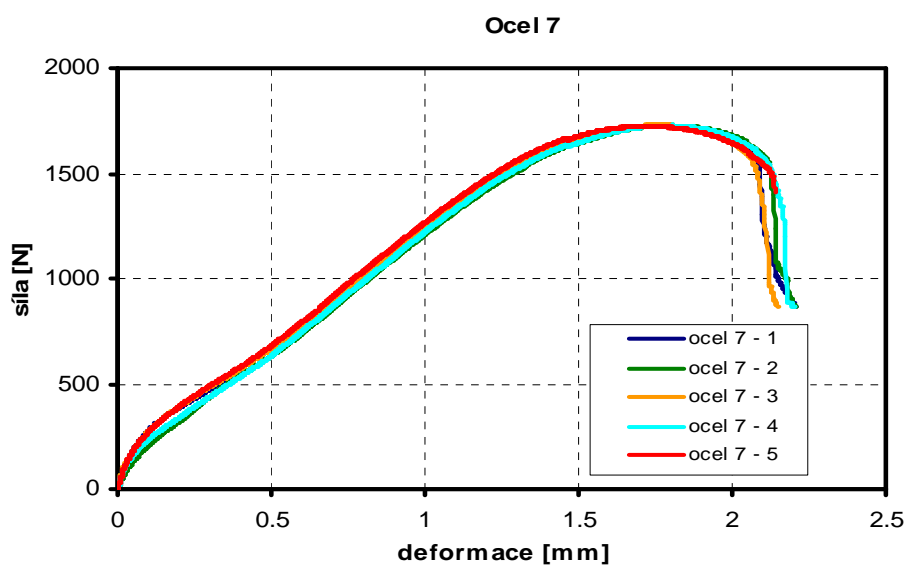


Obr. 56 Záznam zkoušek SP test pro ocel - Ocel 6 [69]

Tab. 6 Naměřené hodnoty pro vzorky z Ocele 6 [69]

Označení vzorku	Tloušťka vzorku [mm]	F_{\max} [N]	Max Deformace [mm]
Ocel 6 - 1	0,500	1789	2,168
Ocel 6 - 2	0,500	1803	2,220
Ocel 6 - 3	0,502	1816	2,212
Ocel 6 - 4	0,500	1828	2,264
Ocel 6 - 5	0,488	1783	2,162

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

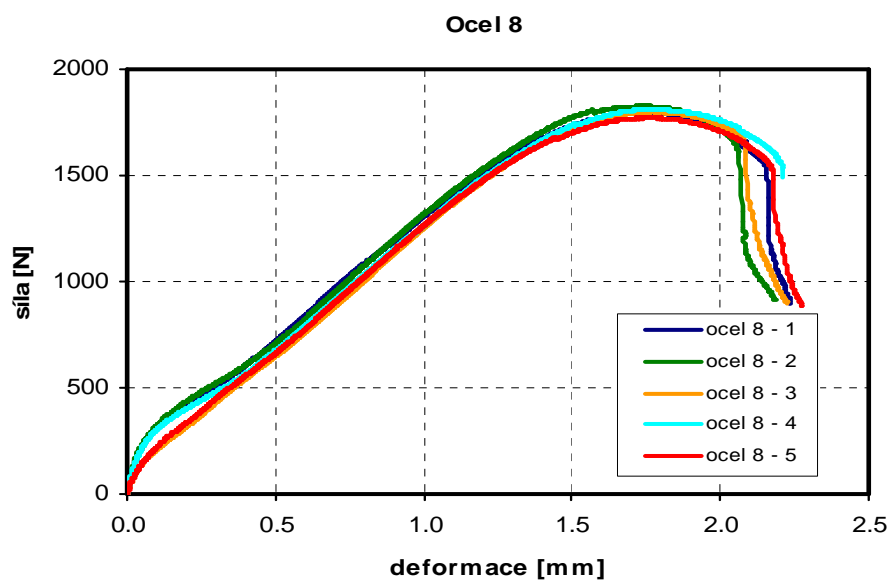


Obr. 57 Záznam zkoušek SP test pro ocel - Ocel 7 [69]

Tab. 7 Naměřené hodnoty pro vzorky z Ocele 7 [69]

Označení vzorku	Tloušťka vzorku [mm]	F_{\max} [N]	Max Deformace [mm]
Ocel 7 - 1	0,500	1728	2,205
Ocel 7 - 2	0,500	1729	2,206
Ocel 7 - 3	0,490	1731	2,147
Ocel 7 - 4	0,503	1729	2,201
Ocel 7 - 5	0,503	1728	2,141

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise



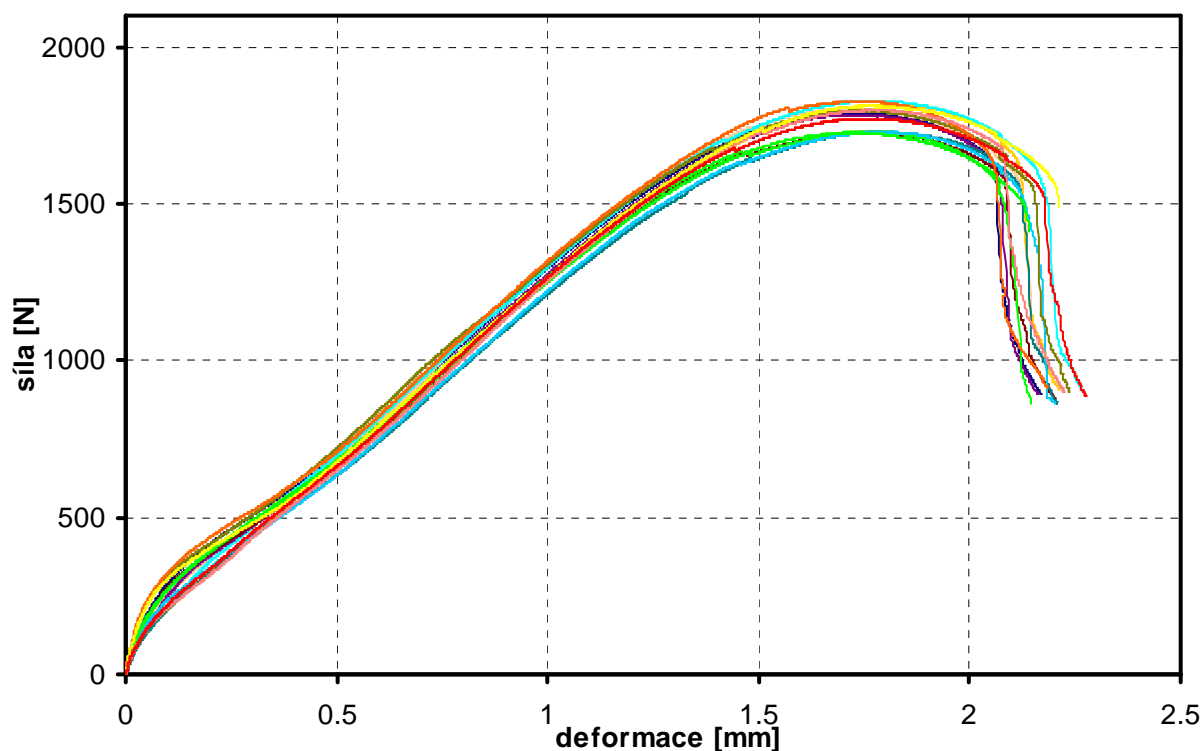
Obr. 58 Záznam zkoušek SP test pro ocel - Ocel 8 [69]

Tab. 8 Naměřené hodnoty pro vzorky z Ocele 8 [69]

Označení vzorku	Tloušťka vzorku [mm]	F_{\max} [N]	Max Deformace [mm]
Ocel 8 - 1	0,503	1798	2,236
Ocel 8 - 2	0,503	1827	2,184
Ocel 8 - 3	0,501	1800	2,223
Ocel 8 - 4	0,500	1811	2,212
Ocel 8 - 5	0,502	1771	2,275

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

Souhrnný graf pro ocele 6, 7, 8



Obr. 59 Záznam zkoušek SP test pro ocele 6, 7, 8 [69]

Obr. 59 byl vytvořen z důvodu porovnání homogenity ocelí 6, 7, 8, které byly odebrány z jednoho polotovaru, avšak z různých míst. Je zřejmé, že graf celkovou homogenitu testovaného materiálu potvrdil.

7.1.4. Korelace mezi zkouškou tahem a SP testem

V žádné dostupné literatuře nebyly nalezeny korelace mezi zkouškou tahem a *SP* testem. Vzhledem k této skutečnosti byl navržen na základě naměřených výsledků vlastní korelační koeficient.

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

Zkoušky tahem a **SP** testy byly provedeny na stejných materiálech, kromě ocele P91, a proto bylo možné porovnat získané hodnoty uvedených zkoušek. Na základě těchto porovnání jsem zjistil závislost mezi mezí pevnosti v tahu (R_m) a maximální silou při **SP** testu (F). Pro odvození korelace pro tento případ zkoušek byl použit standardní vztah používaný u creepových zkoušek a hledána byla hodnota parametru k_{sp} . Tento vztah je následující:

$$\frac{F}{\sigma} = 3.33k_{sp}R^{-0.2}r^{1.2}h_0 \quad (19)$$

F - maximální síla při **SP** testu

R_{sp} - poloměr otvoru v disku (+0,2 mm při pevném uložení disku)

r - poloměr vtláčovací kuličky (1,25 mm)

h_0 - počáteční tloušťka vzorku (0,500 mm \pm 0,005 mm)

k_{spv} - mnou navržený koeficient při pevném uložení disku pro následné oceli (1,385)

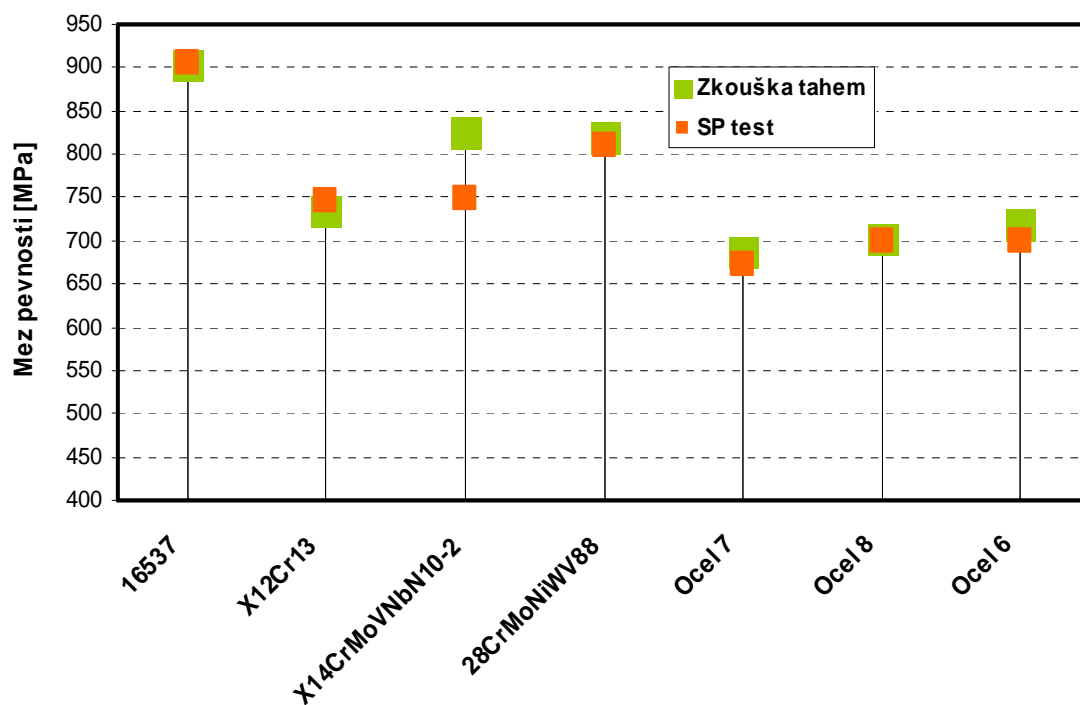
σ (R_m) maximální napětí při SP testu

Pro každý testovaný materiál se použil průměr z naměřených hodnot:

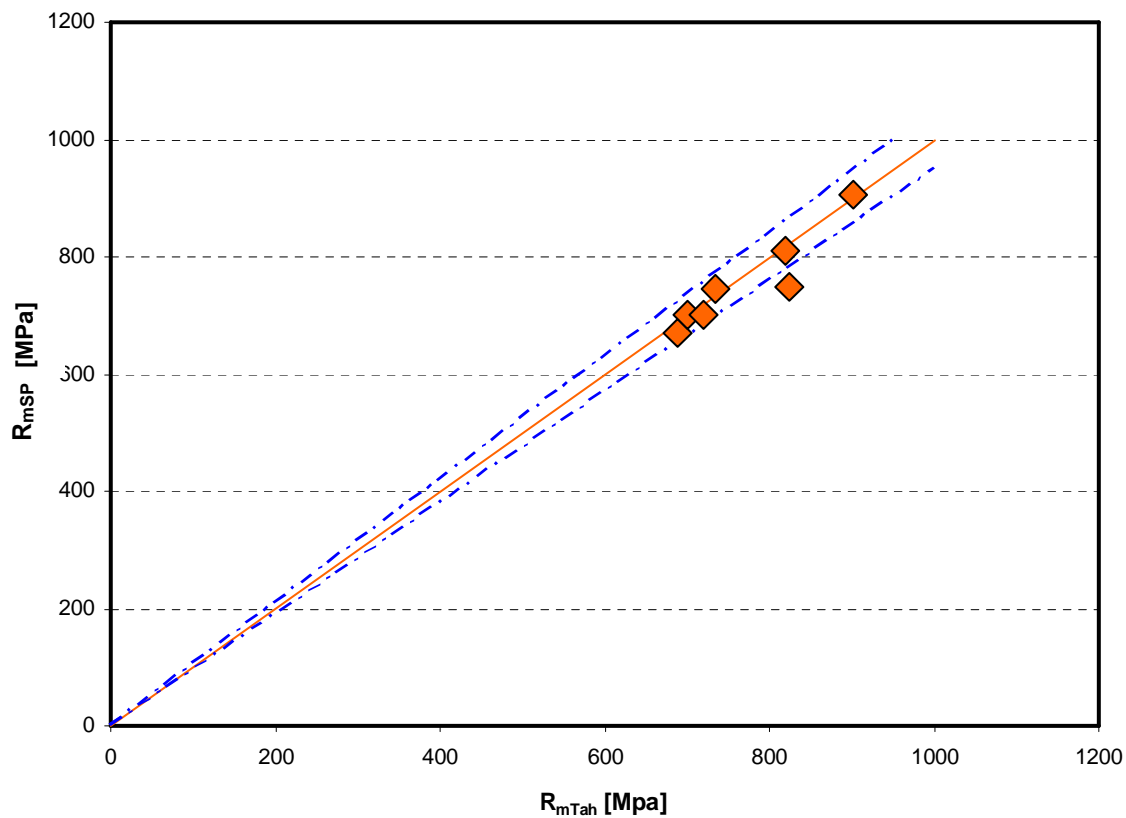
Tab. 9 Porovnání hodnot zkoušek tahem se SP testy po korelaci

Materiál	F_{max} [N] - SP test	R_m [MPa] - zkouška tahem	R_{msp} [MPa] SP po korelaci
16537	2331	902,8	905,5
X12Cr13	1919	733,4	745,4
X14CrMoVNbN10-2	1928	824,0	748,9
22CrMoNiWV8-8	2085	820,2	809,9
Ocel 7	1729	688,2	671,6
Ocel 8	1801	700,9	699,6
Ocel 6	1804	719,3	700,8

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise



Obr. 60 Porovnání mezí pevností SP testů a zkoušek tahem [69]



Obr. 61 Ověření spolehlivosti odvozených korelačních vztahů [69]

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

7.1.5. Resumé

Z obr. 60 a 61 je patrné, že přepočtový vztah pro získání meze pevnosti u **SP** testu se změněným koeficientem vyhovuje pro všechny zkoušené ocele, s výjimkou ocele X14CrMoVNB10-2. Je to způsobeno značnou rozdílností výsledků vzorků 1 a 2 oproti zbylým třem vzorkům tohoto zkoušeného materiálu (**obr. 51**, str. 75). Rozdílnost výsledků vzorků 1 a 2 byla způsobena heterogenitou materiálu. Nejsou-li výsledky testu pro vzorky 1 a 2 uvažovány a korelace je provedena pouze pro průměr hodnot zbylých tří vzorků, dostáváme opět mez pevnosti u **SP** testu téměř identickou s mezí pevnosti σ pro tento materiál.

Po dosažení konstant do výše zmíněného vzorce je možné poměr mezi F a σ vyjádřit takto:

$$\frac{F}{\sigma} = 2,574$$

F – maximální síla při **SP** testu

σ – mez pevnosti při **SP** testu

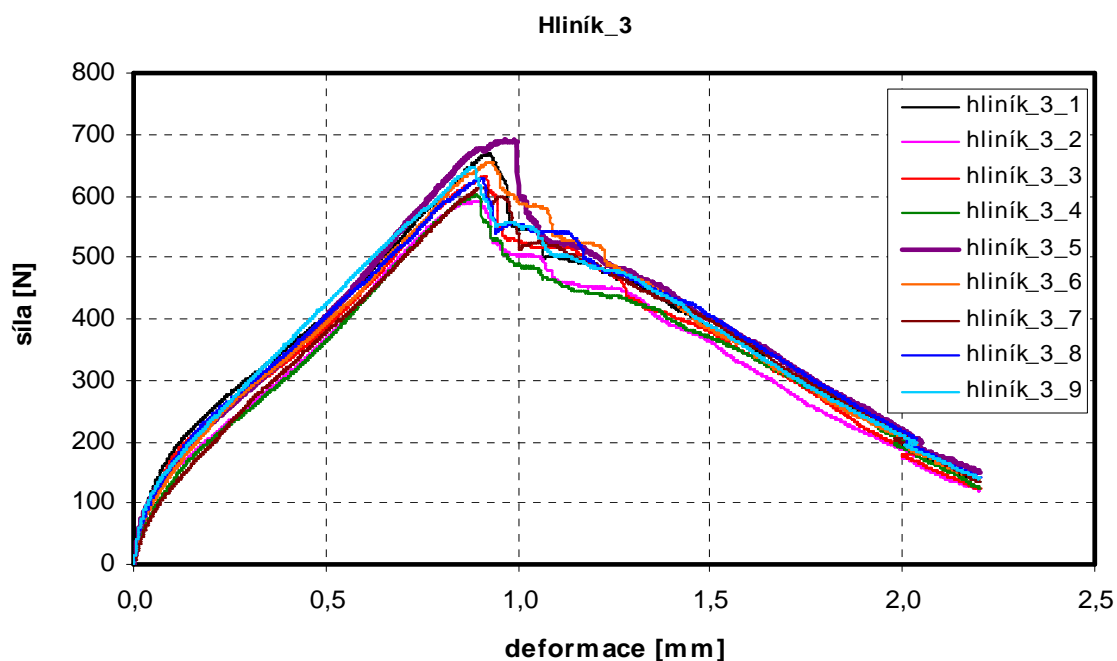
Na základě těchto výsledků byl v roce 2010 akreditován zkušební postup pro stanovení meze pevnosti pomocí **SP** testu, který je součástí nabízených služeb VZÚ Plzeň-Mechanická zkušebna [42].

7.1.6. Příprava vzorků pomocí pily s mikrometrickým posuvem

Pro další experimenty byly vzorky vyráběné na nové pile Micron s přesností řezu 0,005mm, což značně zrychluje výrobu penetračních těles – výroba jednoho zkušebního vzorku nyní trvá cca 5min. Byly provedeny zkoušky na materiálech 16537 (ROTOR C), hliník_3, hliník_7, dural (**obr. 62 – 67**). Naměřené hodnoty jsou uvedeny v **tab 9 - 13**. Pro materiály hliník_3, hliník_7 a dural bylo potřebí stanovit nové korelační vztahy, závislost síly x mez pevnosti u slitin jsou značně odlišné od ocelí.

U materiálu P92, u kterého byly penetrační testy provedeny nedávno, se potvrdilo, že přepočty stanovené v [42], je možné použít i pro tento materiál.

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

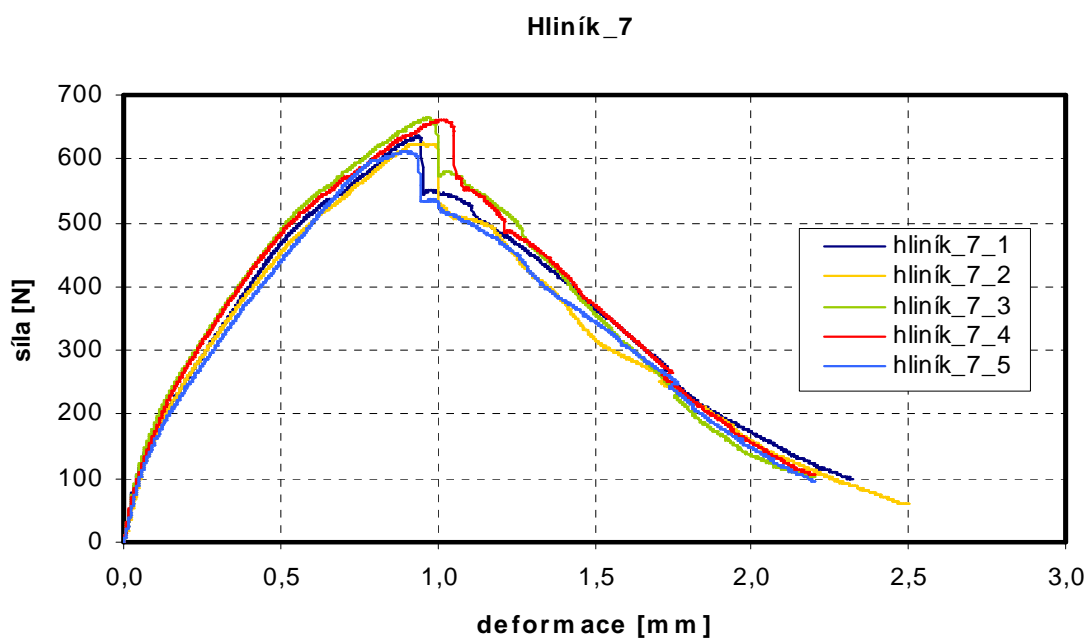


Obr. 62 Záznam zkoušek SP test pro Hliník_3 [43]

Tab. 10 Naměřené hodnoty pro vzorky z Hliníku_3 [43]

Označení vzorku	Tloušťka vzorku [mm]	F_{\max} [N]	Max Deformace [mm]
Hliník_3_1	0,501	669	0,93
Hliník_3_2	0,491	591	0,86
Hliník_3_3	0,492	633	0,92
Hliník_3_4	0,498	602	0,89
Hliník_3_5	0,498	691	0,96
Hliník_3_6	0,503	656	0,92
Hliník_3_7	0,500	614	0,91
Hliník_3_8	0,507	629	0,91
Hliník_3_9	0,506	648	0,88

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

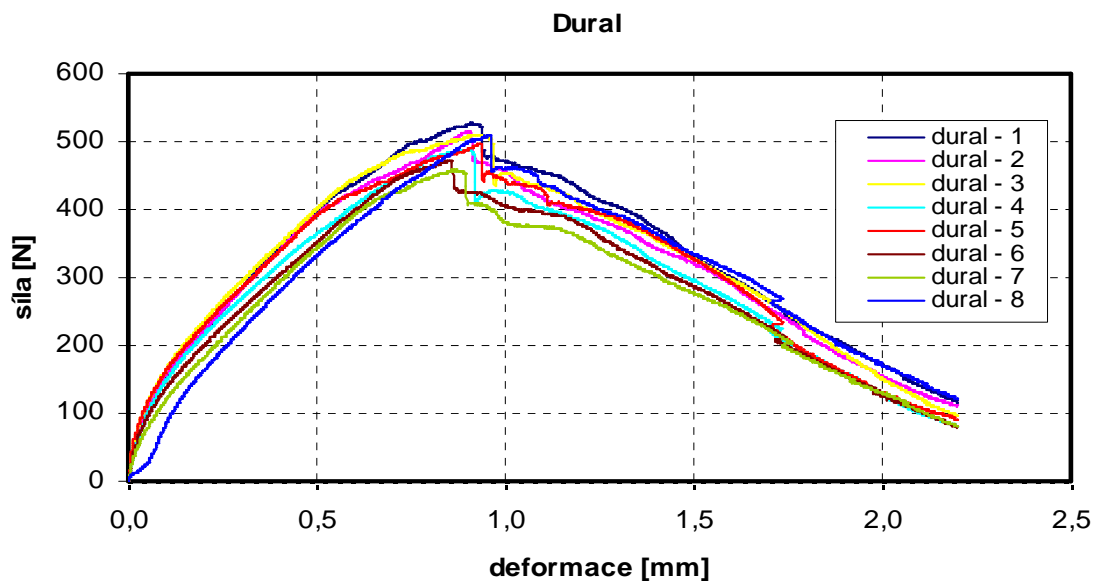


Obr. 63 Záznam zkoušek SP test pro Hliník_7 [43]

Tab. 11 Naměřené hodnoty pro vzorky z Hliníku_7 [43]

Označení vzorku	Tloušťka vzorku [mm]	F_{\max} [N]	Max Deformace [mm]
Hliník_7_1	0,502	630	0,91
Hliník_7_2	0,503	625	0,95
Hliník_7_3	0,502	664	0,97
Hliník_7_4	0,509	663	1,01
Hliník_7_5	0,501	613	0,90

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

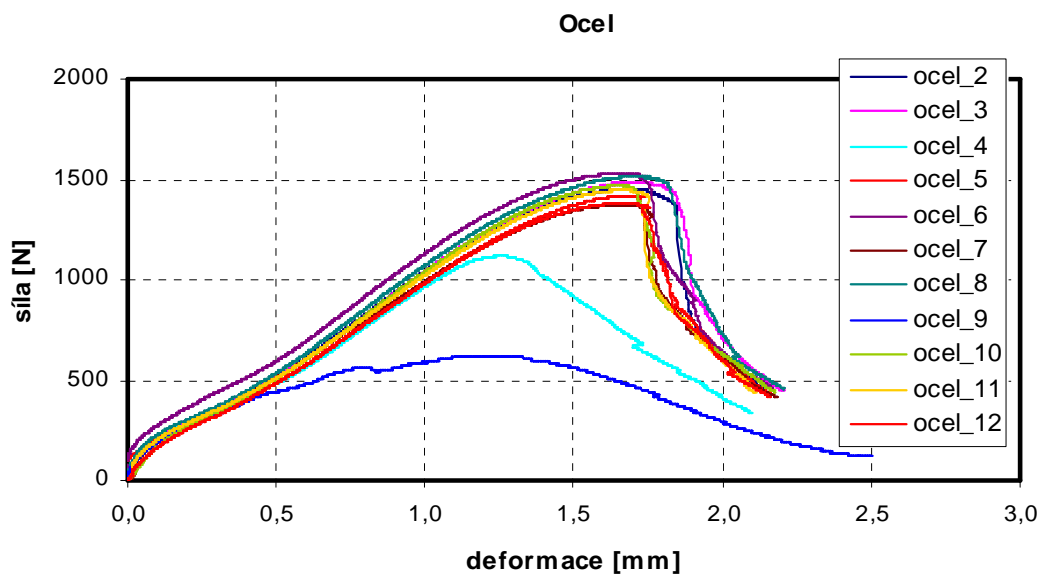


Obr. 64 Záznam zkoušek SP test pro Dural [43]

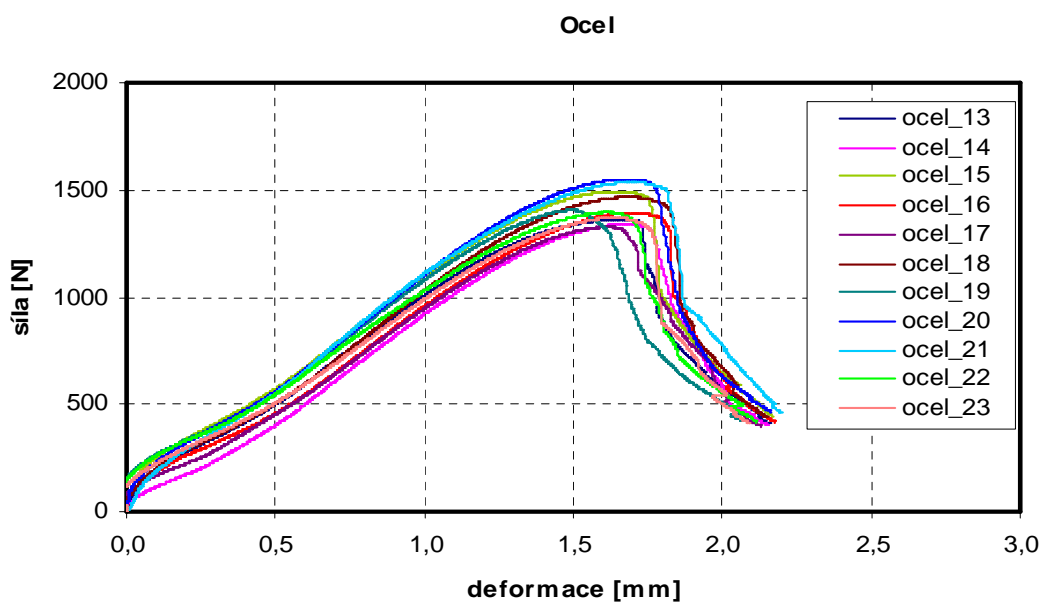
Tab. 12 Naměřené hodnoty pro vzorky z Duralu [43]

Označení vzorku	Tloušťka vzorku [mm]	F_{\max} [N]	Max Deformace [mm]
Dural - 1	0,510	527	0,91
Dural - 2	0,500	516	0,90
Dural - 3	0,504	510	0,91
Dural - 4	0,484	489	0,90
Dural - 5	0,501	497	0,93
Dural - 6	0,480	473	0,85
Dural - 7	0,483	458	0,86
Dural - 8	0,504	510	0,96

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise



Obr. 65 Záznam zkoušek SP test pro Ocel [43]



Obr. 66 Záznam zkoušek SP test pro Ocel [43]

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

Tab. 13 Naměřené hodnoty pro vzorky z Ocele [43]

Označení vzorku	Tloušťka vzorku [mm]	F_{\max} [N]	Max Deformace [mm]
Ocel_2	0,476	1453	1,68
Ocel_3	0,470	1486	1,67
Ocel_4	0,450	1122	1,27
Ocel_5	0,408	1420	1,69
Ocel_6	0,513	1531	1,65
Ocel_7	0,470	1375	1,65
Ocel_8	0,491	1518	1,73
Ocel_9	0,469	622	1,25
Ocel_10	0,489	1469	1,64
Ocel_11	0,450	1448	1,65
Ocel_12	0,475	1382	1,65
Ocel_13	0,459	1365	1,64
Ocel_14	0,439	1342	1,67
Ocel_15	0,478	1492	1,62
Ocel_16	0,478	1393	1,68
Ocel_17	0,438	1328	1,60
Ocel_18	0,501	1467	1,67
Ocel_19	0,478	1407	1,49
Ocel_20	0,480	1552	1,67
Ocel_21	0,500	1540	1,68
Ocel_22	0,445	1396	1,60
Ocel_23	0,458	1370	1,63

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

Výsledný korelační vztah pro hliník_3 $\frac{F}{\sigma} = 1,535$

Výsledný korelační vztah pro hliník_7 $\frac{F}{\sigma} = 1,234$

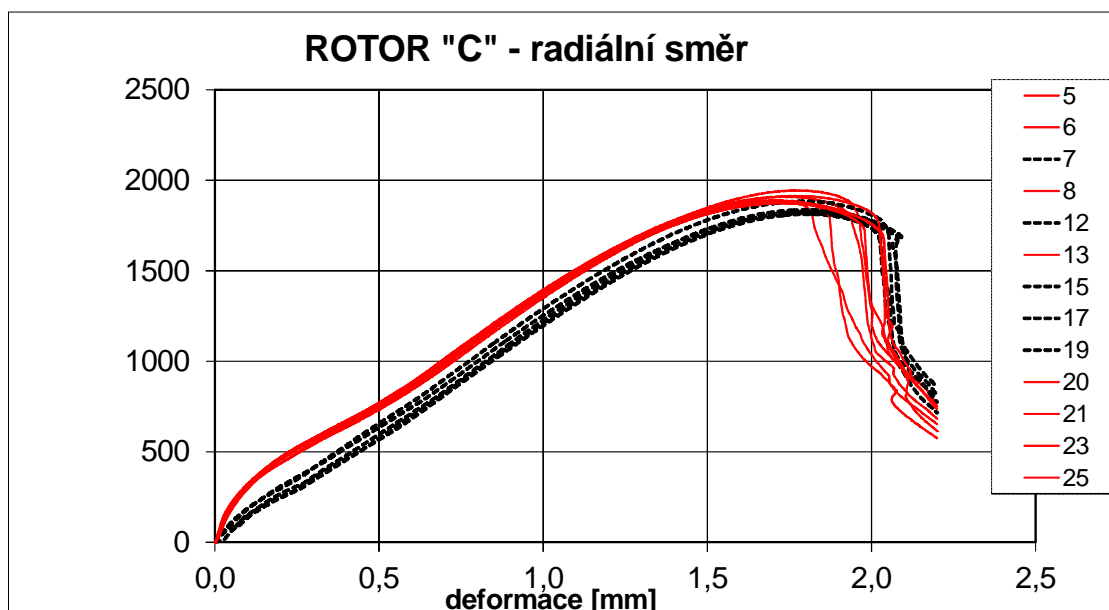
Výsledný korelační vztah pro dural $\frac{F}{\sigma} = 1,108$

Z **tab.13** je patrné, že vliv tloušťky vzorků pro testovaný materiál má značný význam, avšak výsledné hodnoty jednotlivých vzorků jsou velmi různorodé, což přisuzují opět tomu, že se nejedná o klasickou ocel. U řady vzorků je maximální síla při **SP** testu větší a jejich tloušťka menší. Tyto výsledky potvrdily nutnost dodržet tloušťku disků co nejpřesněji v rozmezí $0,5 \pm 0,005$ mm [43].

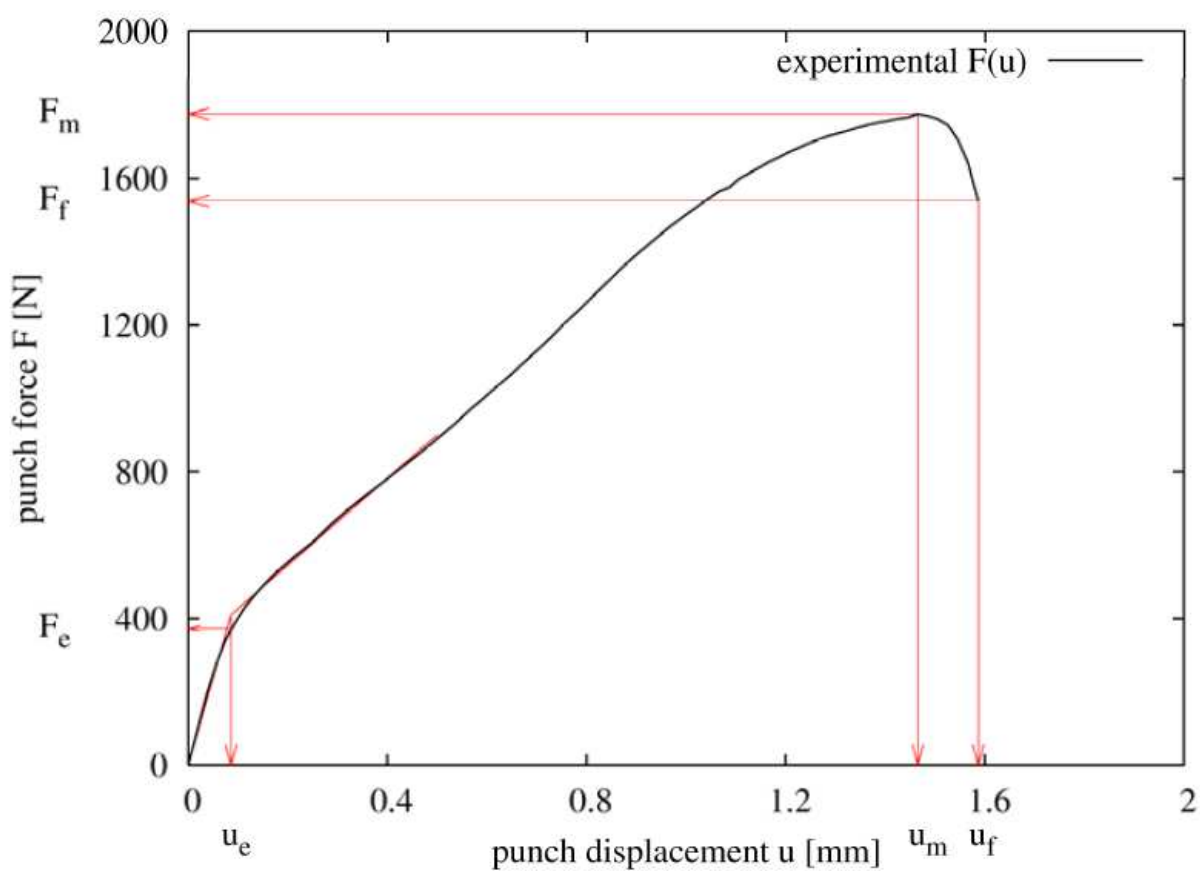
7.1.7. Porovnání odlišné výroby vzorků

U materiálu ROTOR C (**obr. 67**), jsem se pokusil některé vzorky nařezat ihned s přesností na $0,5 \pm 0,005$ mm, což by ještě přípravu vzorků značně urychlilo. Na následujícím grafu je patrné, že dochází k značným odchýlkám v první fázi zkoušky, což znemožňuje další korelace pro mez kluzu, proto bylo od tohoto postupu ustoupeno a vzorky se dolešťují na metalografické brusce. Korelace mezi mezí kluzu u zkoušky tahem a mezí kluzu u penetračních testů není v této práci provedena, neboť se v současné době připravuje norma pro provádění **SP** testů a stále není jasné, zda bude odečítána mez kluzu dle [31] (**obr. 68**), nebo se bude vyhodnocovat podobným způsobem jako u zkoušky tahem, čili pomocí směrnice. Výsledné závislosti tak zatím pozbývají na významu.

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise



Obr. 67 Porovnání vzorků vyrobených na míru řezem-černě, červeně + broušení, leštění [44]

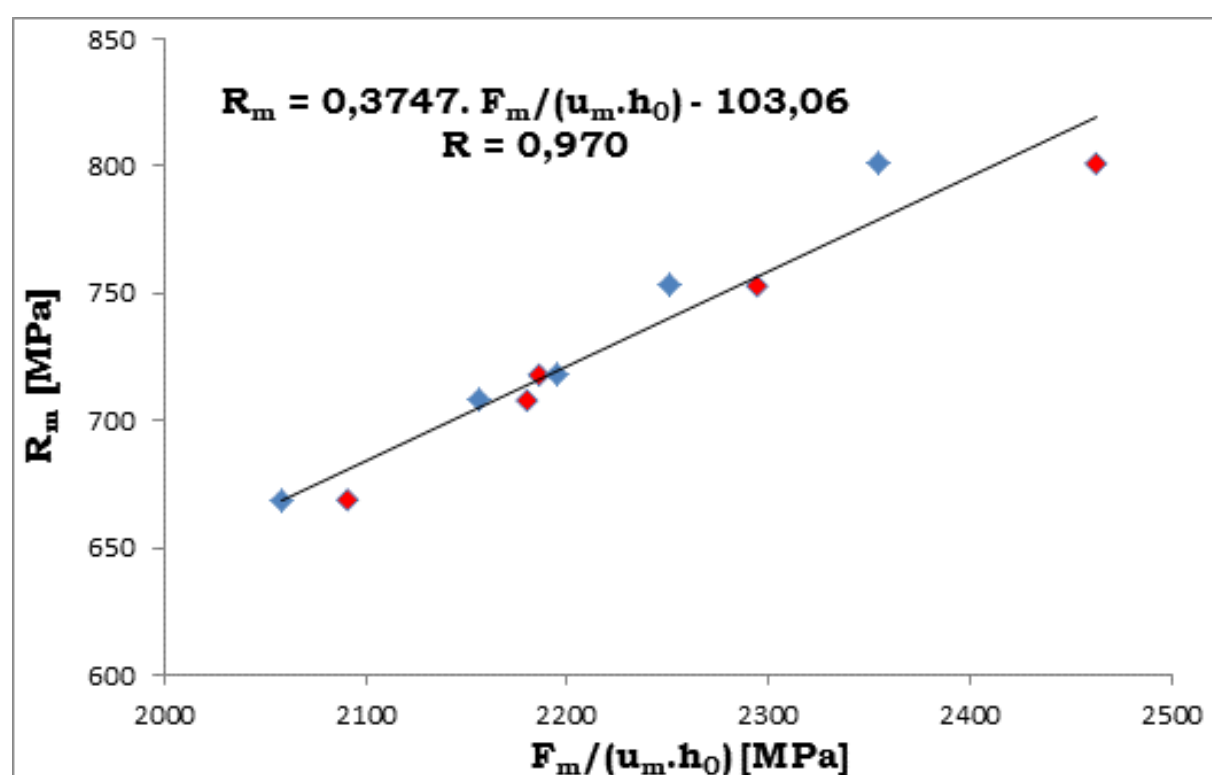


Obr. 68 Vyhodnocování meze kluzu dle [31]

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

7.1.8. Porovnávací testy VZÚ Plzeň x MMV Ostrava

V rámci grantu CESEN, byly společně s MMV Ostrava provedeny porovnávací testy, pro stanovení meze kluzu a meze pevnosti pomocí *SP* testů, u meze pevnosti bylo dosaženo 97% - ní shody, což je na různorodost obsluhy, měřícího zařízení, atd. vynikající výsledek (*obr. 69*), totéž se bohužel nepotvrdilo u meze kluzu. Odstranění těchto nesrovnalostí je předmětem výzkumu společně s MMV Ostrava.



Obr. 69 Porovnávací test MMV, s.r.o. – VZU Plzeň, s.r.o.

Razník ϕ 2,5 mm, kulička ϕ 2,5 mm

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

7.1.9. Vliv imperfekcí instrumentace na výsledky SP testu

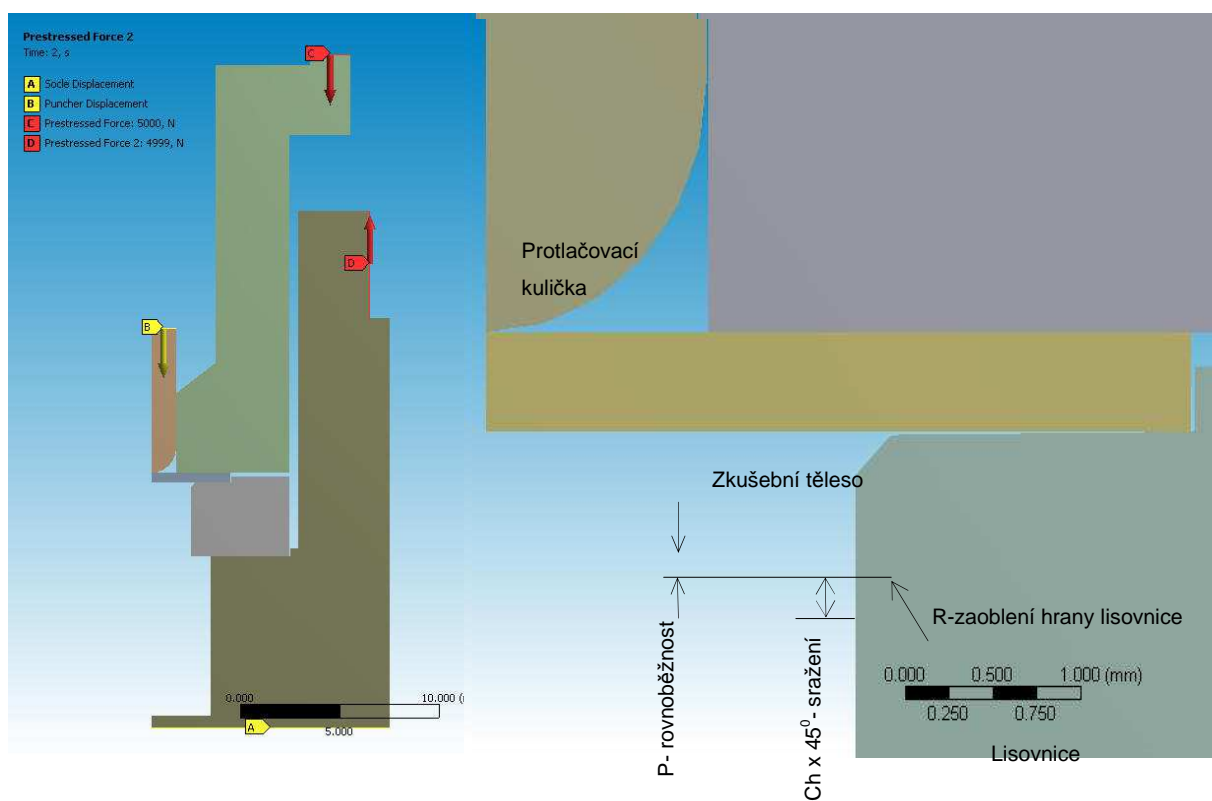
Simulace SP test

Geometrický model zahrnuje přípravek používaný pro penetrační testy a zkušební tělesa – disk o průměru 8 mm a výšce 0,5 mm [45]. Model přípravku se zkušebním tělesem je vytvořen s využitím symetrie vzhledem k svislé ose přípravku. Tření v kontaktu mezi díly přípravku a diskem je uvažováno hodnotami součinitele tření f v mezích 0,07 až 0,2. Upnutí zkušebního tělesa v přípravku zajišťují síly C a D od převlečné matice. Geometrický model ve výkresové konfiguraci zatěžovacího přípravku je zobrazen na **obr. 70**. Materiály dílů přípravku (oceli, INCONEL625 a korund) se uvažují příslušnými hodnotami modulů pružnosti a Poissonovými čísly. Model materiálu lisovnice (INCONEL625) navíc zahrnuje izotropního zpevnění. Ve výkresové konfiguraci se uvažuje s hodnotou součinitele tření $f = 0,07$ [46]. Studium vlivu geometrických imperfekcí lisovnice zahrnuje sražení hrany lisovnice $Ch = 0,3$ mm (výkresové sražení hrany $Ch = 0,2$ mm) zaoblení hrany lisovnice poloměrem $R = 0,02$ mm a imperfekci rovnoběžnosti plochy zahloubení pro zkušební těleso o velikosti $P = 0,02$ mm (**obr. 70**).

Vlastnosti oceli P92 použité při simulaci jsou určeny modulem pružnosti $E = 210000$ MPa, Poissonovým číslem $\nu = 0,3$ a závislostí skutečného napětí na skutečné poměrné plastické deformaci odvozenou ze skutečného tahového diagramu. Skutečný tahový diagram je v oblasti poměrných deformací nad smluvní mezí pevnosti korigován s cílem dosažení shody smluvního tahového diagramu oceli stanoveného experimentálně a simulací (**obr. 71**).

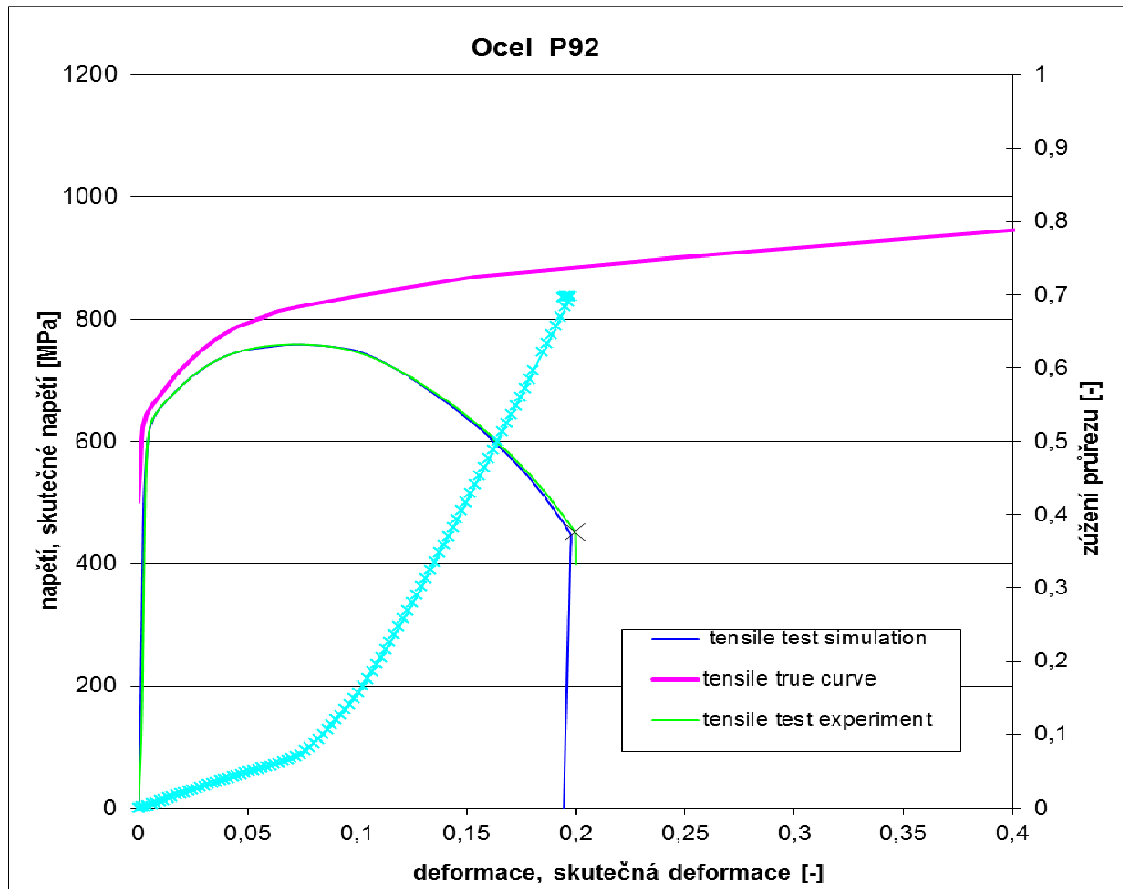
V prvním kroku simulace **SP** testu bylo modelováno upnutí zkušebního disku do zkušebního přípravku silami C a D. V druhém kroku je disk stále upnut silami C a D a postupně je zatěžován posuvem děrovače, až je dosaženo jeho předvolené hodnoty.

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise



Obr. 70 Model a zkoumané imperfekce [48]

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise



Obr. 71 Tahové diagramy oceli P92 [48]

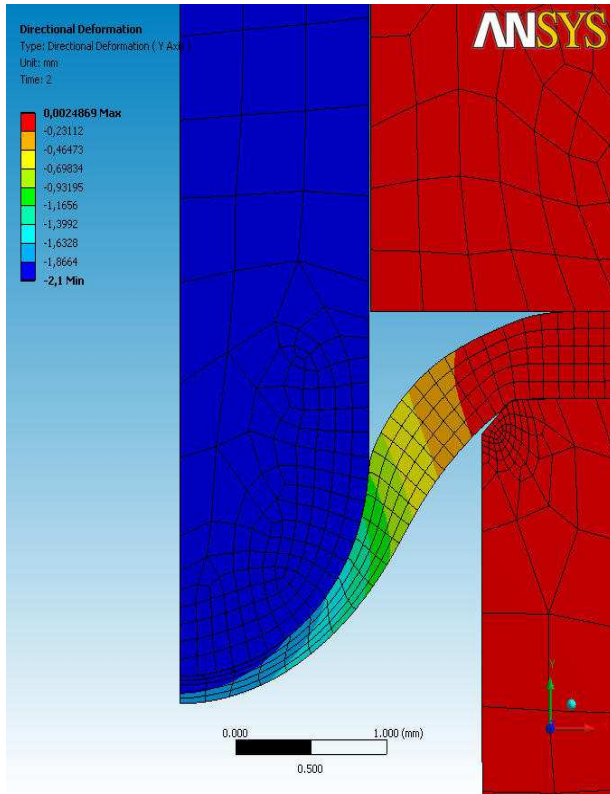
7. 1. 9. 2 Výsledky simulace SP testu a jejich vyhodnocení

Celková deformace a napětí HMH po ukončení zkoušky při standardní konfiguraci SP testu je vykreslená na *obr. 72* a *obr. 73*. Vypočítané závislost síly a maximálního napětí HMH ve zkušebním disku na přemístění děrovače je spolu s výsledky experimentů [47] (zkušební disky P92_molyko01 – 04) vykreslena na *obr. 74*. Maximální vypočítaná síla při protlačovací zkoušce je o 5 % větší, než je hodnota zjištěná experimentem. Přemístění děrovače při maximální vypočítané síle je o 2 % menší, než je experimentálně zjištěná hodnota.

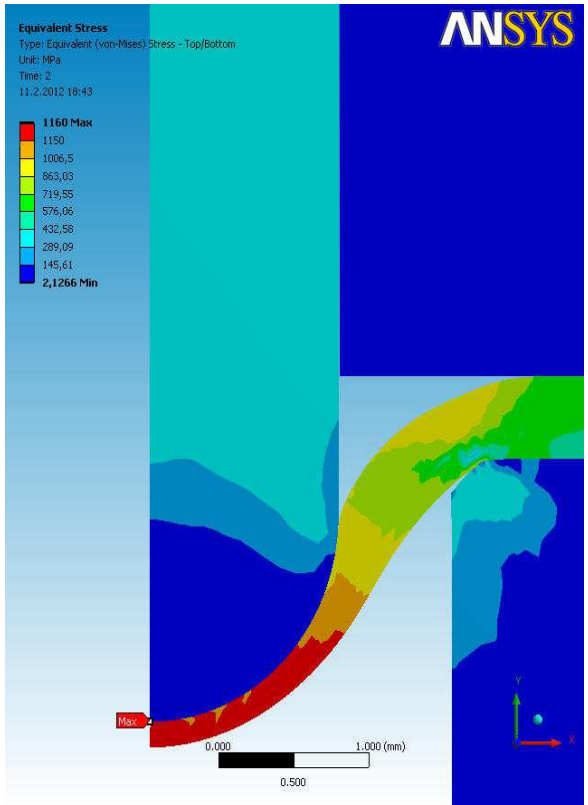
Je zřejmé, že již na začátku SP testu je významný rozdíl závislostí síly na přemístění získanými experimentálně a simulací. Podle průběhu napětí HMH ve zkušebním disku (*obr. 73*), vzniká tato odchylka v oblasti závislosti, kde ocel je v elastickém stavu nebo stavu s málo rozvinutou plastickou deformací. Při zvětšování rozsahu a velikosti plastických deformací se odchylka zmenšuje. Tento poznatek je v rozporu s očekáváním, že shoda výsledků experimentů s výsledky simulace je v počátku SP testu velká a s rozvojem plastické

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

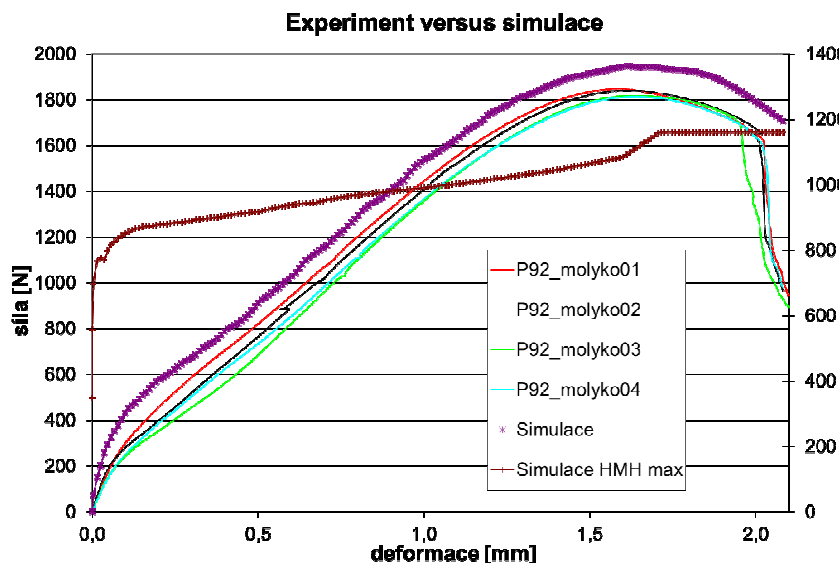
deformace se zmenšuje. Proto jsou zkoumány vytipované parametry ovlivňující výsledky *SP* testu: velikost upínací síly, imperfekce zatěžovacího přípravku a tření mezi díly zkušebního přípravku a zkušebním tělesem. Vliv velikosti upínací síly od 150N do 5000 N je ukázán na (*obr. 75*). Malá hodnota upínací síly způsobuje zmenšení zatěžovací síly od zahájení *SP* testu do přemístění přibližně 1,3 mm a naopak malé zvýšení zatěžovací síly od přemístění 1,5 mm.



Obr. 73 Deformace na konci SP testu [48]



Obr. 72 Napětí HMH na konci SP testu [48]



Obr. 74 Síla versus posuv [48]

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

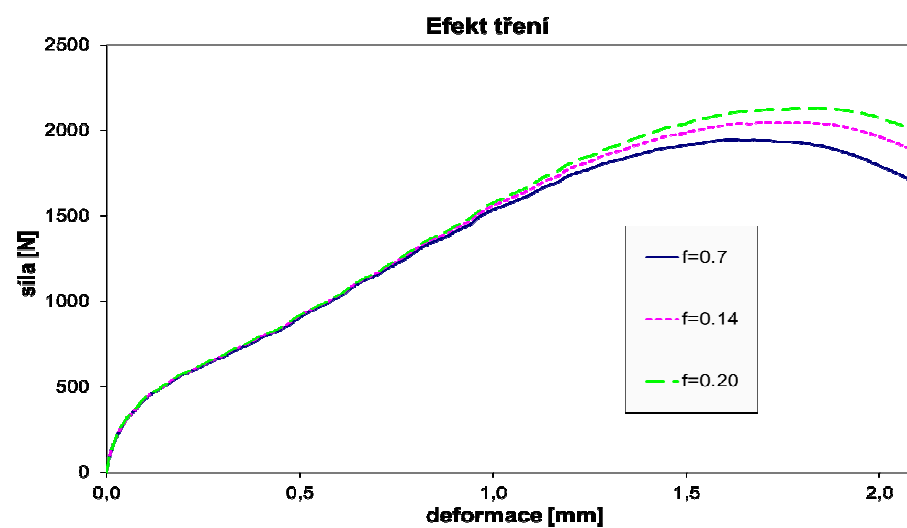
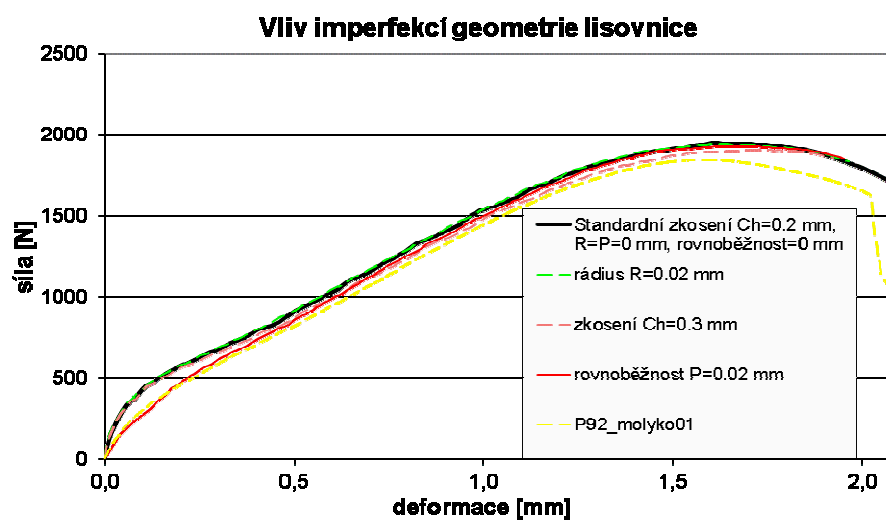
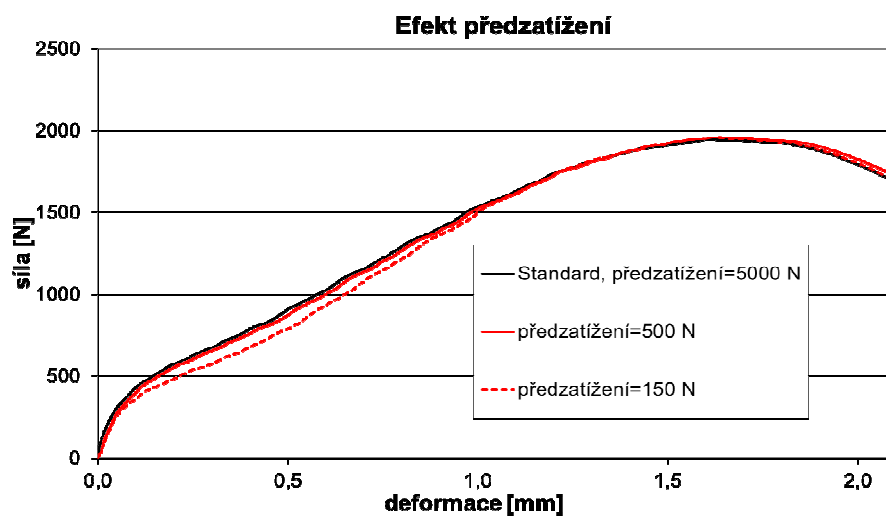
Od předpětí 500 N je vliv velikosti předpětí zanedbatelný. Je zřejmá potřeba zvýšit reprodukovatelnost výsledků **SP** testů standardizací postupů upínání disku. Vliv imperfekcí geometrie lisovnice na výsledky **SP** testu je spolu s výsledkem experimentu znázorněn na **obr. 76**. Zaoblení hrany lisovnice $R = 0,02$ je odhadnuto z trvalé deformace hrany po odlehčení zkušebního tělesa. Takto velké zaoblení hrany lisovnice má marginální vliv na výsledek **SP** testu. Naproti tomu zvětšení sražení hrany lisovnice na $Ch = 0,3$ mm a imperfekce rovnoběžnosti plochy lisovnice $P = 0,02$ mm, která je v kontaktu s plochou zkušebního tělesa způsobí významné změny závislosti síla na přemístění. Zvětšení sražení hrany na 0,3 mm se projevuje zmenšením zatěžovací síly od přemístění 0,25 mm prakticky do konce testu.

Nerovnoběžnost způsobuje výrazné zmenšení zatěžovací síly zejména v počátku zatěžování, se zvětšováním přemístění děrovače se odchylka zmenšuje. Odchytky simulace **SP** testu od experimentu mohou být způsobeny imperfekcí rovnoběžnosti dosedacích ploch testovacího zařízení. Vzhledem k různým směrníci závislosti síla – přemístění při experimentech **SP** testu (**obr. 74**), lze očekávat i významný vliv imperfekcí rovnoběžnosti dosedacích ploch zkušebních disků na výsledky **SP** testu.

Vliv tření mezi zatěžovacím přípravkem a zkušebním diskem je znázorněn na **obr. 77**. Zvětšování hodnoty součinitele tření zvětšuje významně zatěžovací sílu od přemístění cca 0,75 mm. Velikost tření ovlivňuje lokalizaci porušení disku. Největší hodnota napětí **HMH** při součiniteli tření $f = 0,07$, resp. 0,2 je ve středu zkušebního tělesa - disku, kde lze očekávat jeho protržení (**obr. 73**), resp. na poloměru cca 0,6 mm, kde je rovněž patrné lokální zmenšení tloušťky disku (**obr. 78**). Výsledky simulace imperfekcí zatěžovacího přípravku **SP** testu ukazují na možné příčiny vzniku odchylek výsledků simulace a experimentu.

Odchytky geometrie zatěžovacího přípravku, disků zkušebních těles a odchytky pracovních postupů nepříjemně ovlivňují výsledky **SP** testu. Uvážíme-li, že hlavní účel **SP** testu spočívá v získání podkladů pro predikci dalšího chování stávajících konstrukcí z hlediska jejich integrity, je nutné použít všech dostupných prostředků k zajištění správnosti a reprodukovatelnosti výsledků **SP** testu. Účinným prostředkem se jeví simulace **SP** testu počítačem, kterou lze použít ke studiu závislosti výsledků **SP** testu na vlastnostech materiálu a vývoji přesnějších metodik vyhodnocování výsledků **SP** testu.

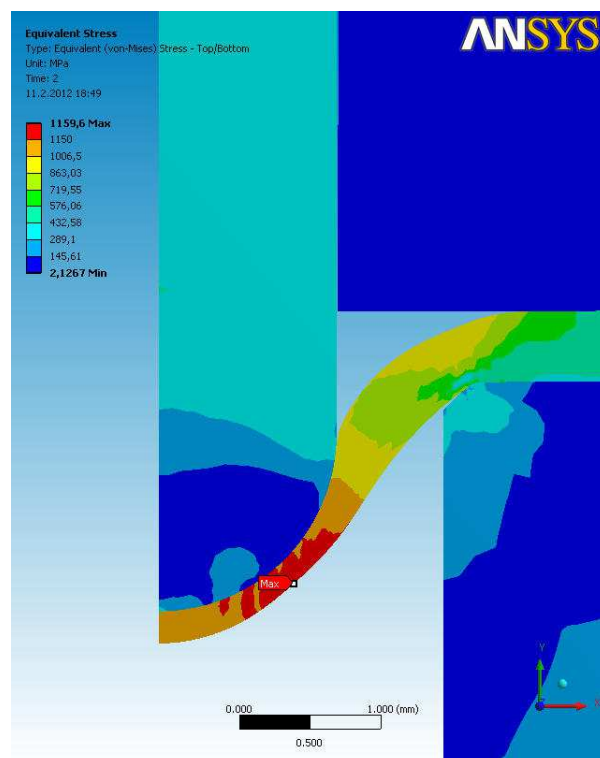
Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise



Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

7.1.10 Zhodnocení

Skutečný tahový diagram a závislost skutečného napětí na plastické deformaci lze stanovit z dat získaných provedením zkoušky tahem na tyči kruhového průřezu. Nejmenší možný rozsah dat umožňující stanovit skutečný tahový diagram oceli zahrnuje napětí a deformace na smluvní mezi kluzu, na mezi pevnosti a při lomu. Výsledky simulace tahové zkoušky a „small punch test“ dobře přiléhají k výsledkům reálných zkoušek. Při větších požadavcích na správnost odhadu parametrů skutečného tahového diagramu se doporučuje smluvní tahový diagram modifikovat s využitím simulace tahových zkoušek. Sledované imperfekce zatěžovacího přípravku způsobují posunutí zatěžovacího diagramu *SP* testu směrem k menším hodnotám síly. Největší vliv na snížení zatěžovací křivky v počátečním stádiu *SP* testu má odchylka od rovnoběžnosti lisovnice. Obdobné výsledky lze očekávat v případě zkušebních vzorků, pokud jejich plochy vykazují nerovnoběžnost v řádu setin mm. Srovnání výsledků experimentů a simulace *SP* testu ukazuje na vliv možných geometrických odchylek přípravku od výkresové dokumentace a vliv náhodných odchylek utahovací síly a geometrie zkušebních vzorků. Účinným prostředkem identifikace systematických a náhodných chyb výsledků se jeví simulace *SP* testu počítačem, kterou lze rovněž použít ke studiu kauzálních vztahů výsledků *SP* testu a vlastností materiálu [48].



Obr. 78 Napětí HMM na konci SPT- $f=0,2$ [48]

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

7.2. SP creep

Pro provedení **SP** creepu bylo použito šest vzorků oceli P91 a devět vzorků oceli SA213-T22. Creepový stroj byl pro účely **SP** creepu speciálně upraven. Tento test byl v creepové zkušebně ŠKODA Výzkum s.r.o. v Plzni proveden poprvé v roce 2006. Po vyzkoušení funkčnosti, byly vyrobeny další přípravky pro sestavení dalších dvou standů 2010 (*obr. 79*).



Obr. 79 Creepové zařízení, speciálně upravené pro SP creep testy

7.2.1. Provedení SP creepu

Zkouška probíhá při konstantním tahovém zatížení. Použity jsou specifická táhla, která mění směr působící síly z tahové na tlakovou. V průběhu zkoušky tlačí na vzorek keramická kulička vyrobená z materiálu na bázi Al_2O_3 o průměru 2,5mm.

Pro provedení zkoušky **SP** creep byl použit shodný přípravek jako pro **SP** test za pokojové teploty. Přípravek je uchycen mezi 2 táhla creepového stroje. Poté byla elektrická odporová

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

pec výškově nastavena tak, aby byl zkušební přípravek umístěn v jejím středu. Následovalo zaizolování pece. Používá se izolační materiál Vermiculite či Kaowool. Na ovládacím zařízení pece byla nastavena požadovaná teplota pro zkoušky. Měření deformace bylo provedeno prostřednictvím kapacitního snímače, který měří deformaci s přesností 0,001 mm.

Z měřicí ústředny (**obr. 81**) může být prováděn sběr dat do počítače v intervalu od 6 sekund do 8 hodin. Z těchto dat je poté zpracována křivka tečení, popř. Larson – Millerův diagram, diagram napětí vs. doba do lomu. Teplota je v průběhu zkoušky regulována termoregulátorem a kontrolním termočlánkem, který je v blízkosti vzorku. Termočlánek Pt, Pt-Rh10%, průměru 5mm, typ S kontroluje, zda nastavená teplota odpovídá teplotě v peci. Zapisovací termočlánek zapisuje průběh teplot v peci. Ta je poté zobrazena na ovládacím zařízení pece (**obr. 80**).



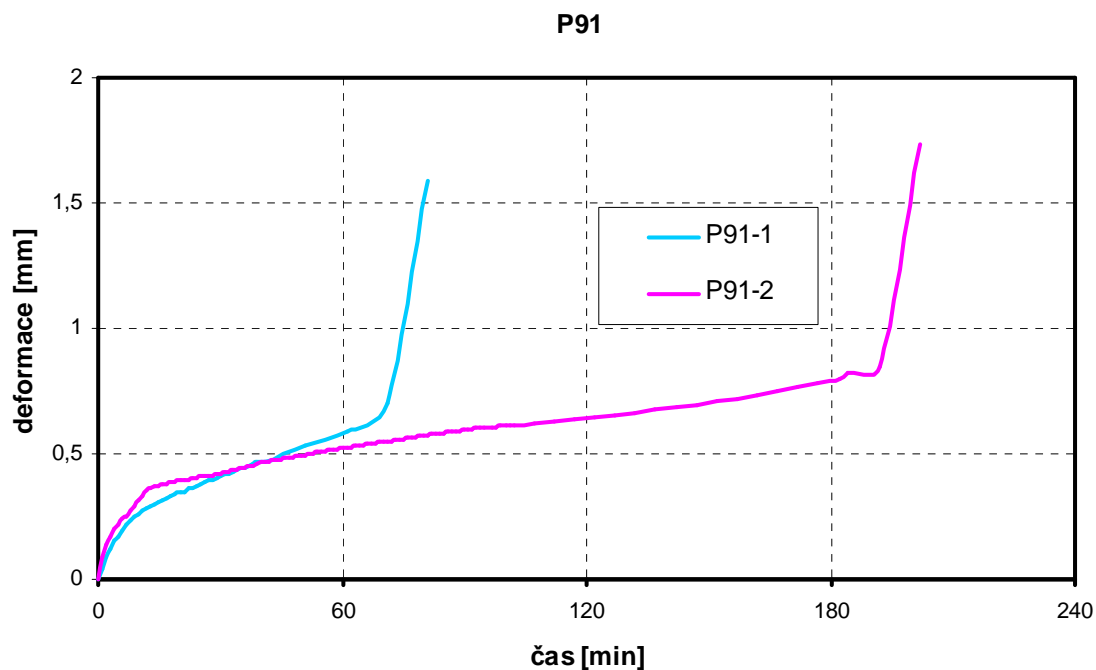
Obr. 81 Ovládací zařízení pece [69]



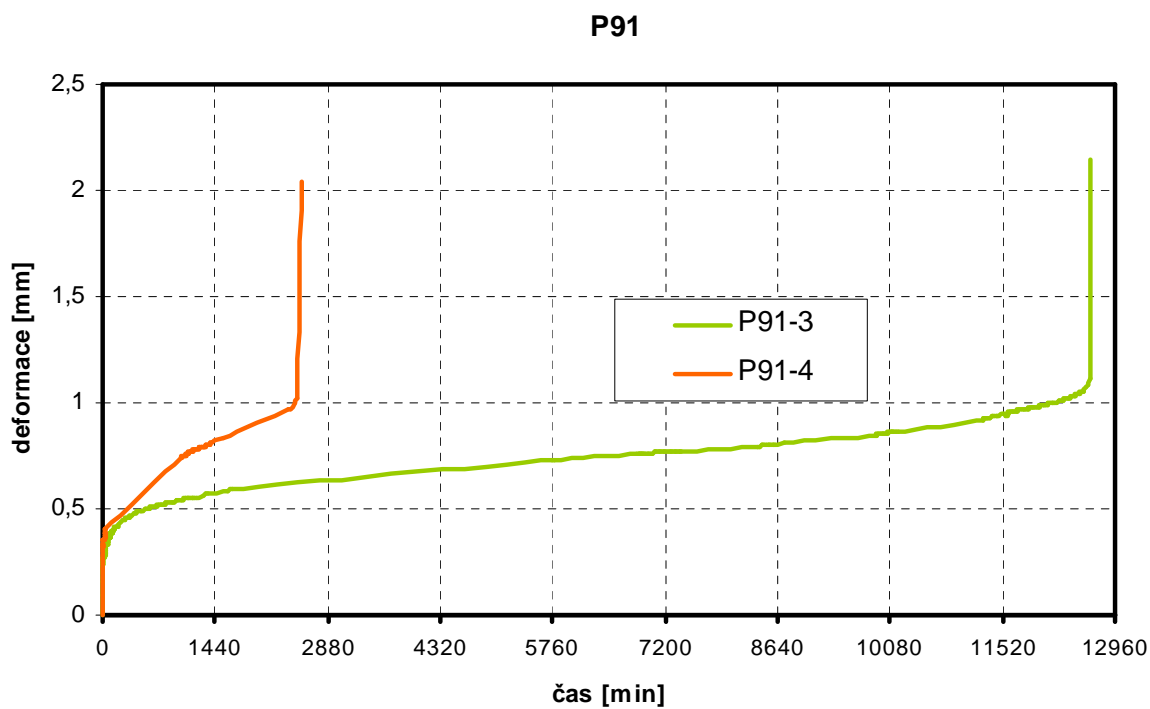
Obr. 80 Měřicí ústředna [69]

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

7.2.2. Experimentální výsledky Small Punch za creepových teplot



Obr. 82 SP creep P91 – závislost deformace na čase [43]



Obr. 83 SP creep P91 – závislost deformace na čase [43]

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

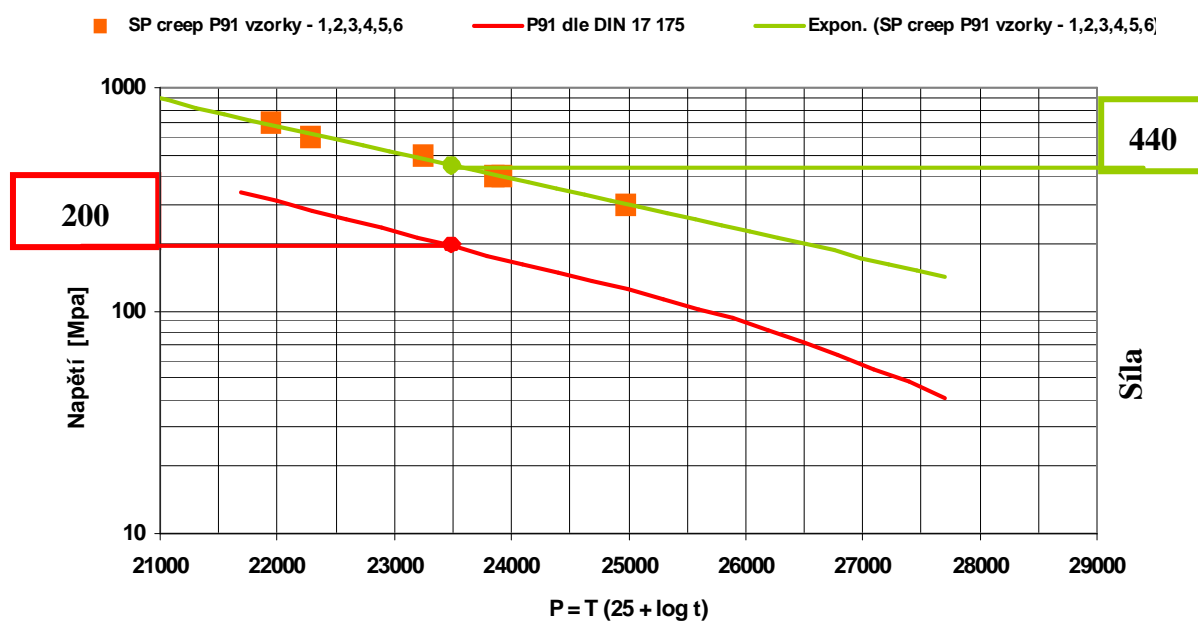
Tab. 14 Komplexní údaje o zkoušených vzorcích [43]

Označení vzorku	Teplota [°C]	Zatížení [N]	Doba do lomu [h]	Max. deformace [mm]	Tloušťka vzorku [mm]
P91-1	600	700	1,35	1,590	0,500
P91-2	600	600	3,37	1,735	0,501
P91-3	600	400	210,88	2,143	0,500
P91-4	600	500	42,23	2,037	0,500
P91-5	600	400	247,67	nebyla měřena	0,499
P91-6	600	300	4135	nebyla měřena	0,500

Na obr. 82, 83 jsou zobrazeny křivky průběhu tečení, na kterých je možné vidět jednotlivá stádia creepu. Výsledky testů jsou v tab. 14.

7.2.3. Porovnání SP testu za creepových teplot s výsledky tradičních creepových testů

Materiál P91:



Obr. 84 Diagram dle Larson – Millera oceli X10CrMoVNb 9 1 (P91) dle DIN 17 175 vs. SP creep P91 [69]

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

Výsledky získané po zkoušce **SP** test za creepových teplot pro ocel P91 byly zaznamenány do diagramu dle Larson Millera a porovnány s výsledky tradičních jednoosých testů této ocele dle [49].

Pro získání napětí u **SP** creep testu jsem použil následující vztahy (viz 2.5):

$$\frac{F}{\sigma} = 3.33k_{sp}R^{-0.2}r^{1.2}h_0 \quad (20)$$

$$\frac{F}{\sigma} = K \cdot \left[2\pi hr \cdot \left(\frac{D}{2R} - \chi \right) \right] \quad (21)$$

Všechny čtyři zkoušené vzorky ocele P91 měly tloušťku 0,500 mm ± 0,001 mm.

Předpoklady pro dosažení do (1): $h_0 = 0,5$ mm, $r = 1,25$ mm, $R = 2,2$ mm, $k_{sp} = 1$

V tomto případě $F/\sigma = 1,88$

V případě (2) dle 2. 4: $F/\sigma = 1,95 \sim 2,06$.

Z diagramu dle Larson – Millera obr. 84 vyplývá, že poměr mezi $F/\sigma = 2,2$ a to pro všechny vzorky, neboť „červená přímka“(výsledky jednoosých creepových testů ocele P91) je rovnoběžná se „zelenou přímkou“, kterou jsme proložili námi získané výsledky z **SP** creep testů ocele P91 [50].

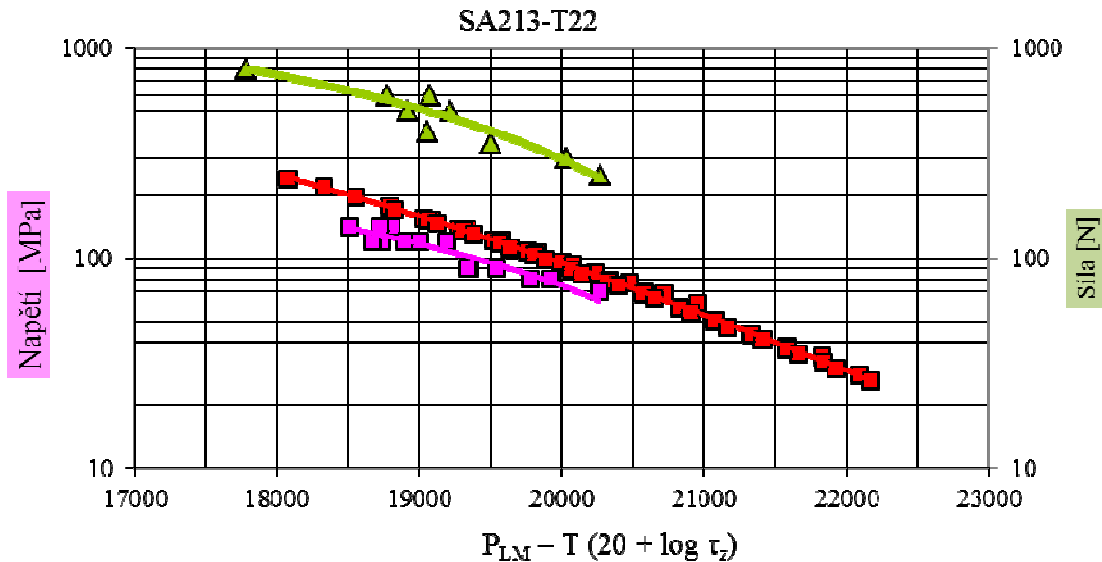
Materiál SA213-T22:

Pro zkoušku **SP** creep test z materiálu kotlových trubek (SA213-T22) bylo vyrobeno celkem 9 vzorků. Úroveň zatížení vzorků byla od 250 N do 800 N při teplotě 580 °C. Výsledkem zkoušky byla doba do lomu jednotlivých vzorků. Při zatížení 250 N byla naměřena největší doba do lomu 5796 hodin (8 měsíců), naproti tomu nejnižší doba do lomu (7 hodin) byla naměřena při zatížení 800 N. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v **tab. 15**, (**obr. 85**).

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

Tab. 15 Výsledky small punch creep testů

Označení vzorku	Teplota [°C]	Zatížení [N]	Doba do lomu [h]
SA213-T22-1	580	250	5796
SA213-T22-2	580	300	3053
SA213-T22-3	580	350	720
SA213-T22-4	580	400	216
SA213-T22-5	580	500	334
SA213-T22-6	580	500	150
SA213-T22-7	580	600	225
SA213-T22-8	580	600	100
SA213-T22-9	580	800	7



Obr. 85 Výsledky creep testů (fialově), výsledky small punch creep testů (zeleně) a tabulkové hodnoty (červeně) [51]

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise



Obr. 86 Vzorek po SPCT



Obr. 87 Části přípravku pro SPCT



Obr. 88 Creepové standy upravené pro SPCT

Z *obr. 85* je patrné, že $F/\sigma = 3$ dle tabulkových hodnot, porovnáme-li výsledky klasických creep testů s *SP* creep testy pak $F/\sigma = 4$. Na *obr. 86.- 88.* Je znázorněn vzorek po creepové zkoušce, přípravek pro zkoušení a zkušební standy pro *SP* creep.

7.2.4. Resumé

Porovnáme-li námi získanou hodnotu pro materiál P91 $F/\sigma = 2,2$ s hodnotou ze vztahu (19), můžeme konstatovat, že rozdíl hodnot uvedeného poměru je 0,32. V případě vztahu (18) je rozdíl hodnot 0,15. Pokud bychom použili diagram dle Larson-Millera pro ocel P91 dle ČSN EN 10 216-2 výsledný vztah by byl identický se vztahem (19), diagram dle ČSN EN 10 216-2 má však menší množství údajů, proto jsme použili diagram dle DIN 17 175. U materiálu SA213-T22 je vzájemný korelační vztah $F/\sigma = 3$, *popř.* $F/\sigma = 4$. Z porovnání těchto dvou materiálů je patrné, že je potřeba stanovit pro každý materiál, který se provozován při creepových teplotách F/σ zvlášť a nelze jej aplikovat univerzálně, jako např. pro mez pevnosti u *SP* testů za pokojových teplot.

Vzhledem k tomu, že se první *SP* creep testy byly realizovány v creepové zkušebně VZÚ Plzeň s.r.o. teprve před několika lety, lze konstatovat, že jsou tyto výsledky uspokojivé. Je ovšem potřeba, vytvořit databázi vzájemných vztahů pro nejpoužívanější materiály za creepových teplot [51, 52].

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

7.3. Small Fatigue Test

7.3.1. Příprava vzorků pro zkoušky únavy, které lze vyrobit z odběrů SP

K výrobě únavových vzorků nejsou používány přímo **SP** vzorky z odběrů, ale miniaturizovaná tělesa vyrobená soustružením, frézováním, broušením, popř. vyřezaná vodním paprskem. Tyto tělesa lze ale vyrobit z materiálu získaného odběrem **SP** vzorků. Pro účely stanovení korelačních závislostí tedy zatím není odběrného zařízení potřeba

Pro miniaturizované vzorky únavy jsme začali používat název **SFT (Small Fatigue Test)**.

Níže je popsán postup zkoušení a dosažené hodnoty a dále se zabývá korelováním výsledků a vlivem různých faktorů na hodnocení únavy materiálu P92, který je průmyslově široce využívaný.

Prioritním zájmem je hodnocení únavy v režimu řízeném silou, který je z hlediska použitých vzorků jednodušší pro srovnání než režim řízený deformací. Proto je použito porovnávání Wöhlerových křivek pokud možno v celém rozsahu, tj. pro nízkocyklovou i vysokocyklovou část.

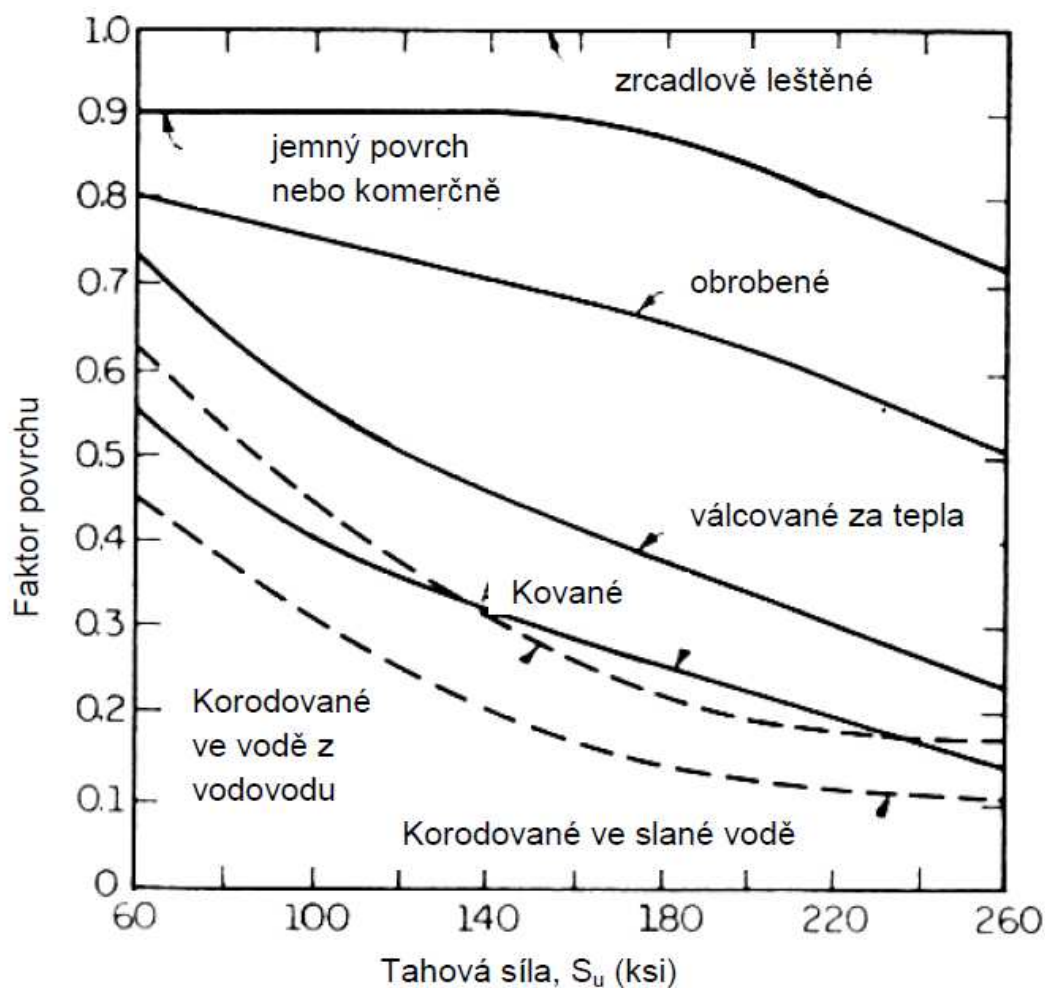
Životnost reálného tělesa se liší od životnosti laboratorního vzorku (mez únavy ozn. σ_c) v důsledku působení řady faktorů. Skutečná mez únavy σ_{cs} se určí podle vztahu

$$\sigma_{cs} = \frac{v_\sigma v_\sigma^* \eta_p}{\beta} \sigma_c, \quad (22)$$

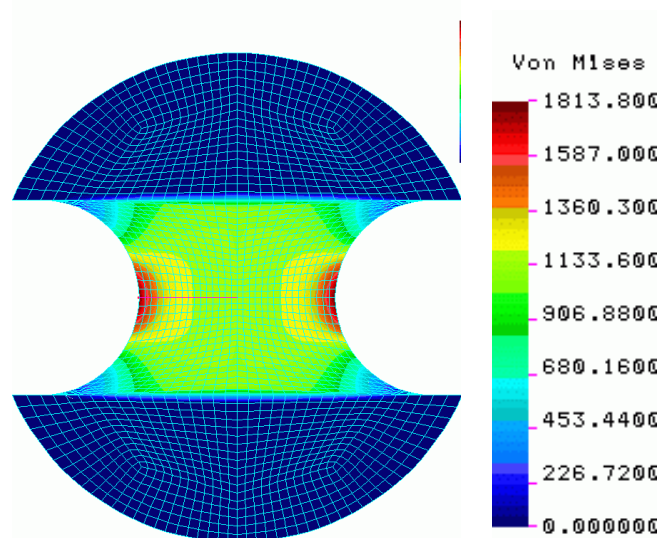
kde korekční členy v_σ, v_σ^* vyjadřují vliv faktoru velikosti, η_p vliv povrchu (**obr. 89**) a β zastupuje vrub. Obdobným způsobem lze přistoupit i ke vzájemnému srovnání laboratorních vzorků.

Pro srovnání **SFT** vzorků (**obr. 90**) a klasických vzorků (**obr. 91**) byla nejdříve řešena vlivem vrubu vzniklá koncentrace napětí, která velmi ovlivní výsledek. Výsledky **SFT** vzorků jsou uváděny v napětí, které je již upraveno faktorem vlivu vrubu. Počítačový model ověřil teoretickou koncentraci napětí na **SFT** únavových vzorcích, kde koncentrace napětí je 1,33 násobkem nominálního napětí (**obr. 90**).

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

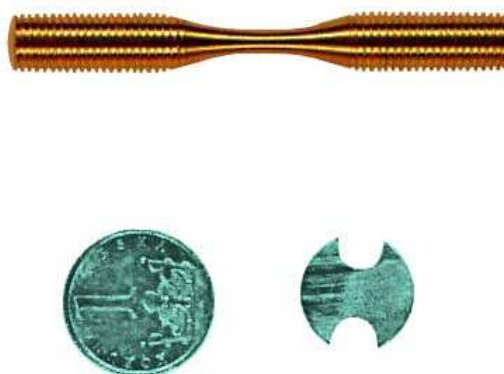


Obr. 89 Vliv opracování povrchu materiálu na mez únavy reálného tělesa (21)



Obr. 90 Modelové rozložení napětí ve vzorku SPT únavy. Červeně označená jsou místa s největší koncentrací napětí [62]

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise



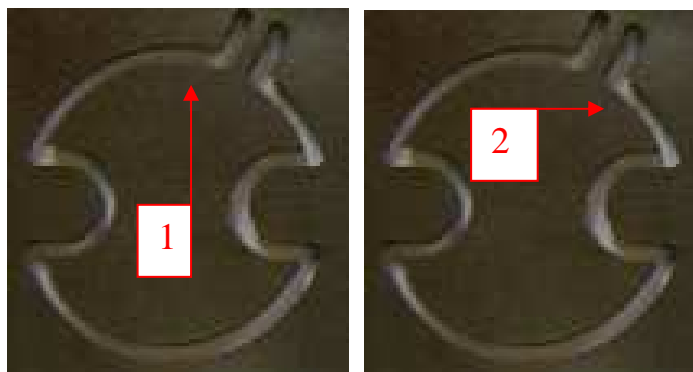
Obr. 91 Klasické těleso (nahore) pro zkoušky únavy, kde koncentrace napětí v nejužším průřezu je 1. Srovnání s SFT vzorkem (vpravo dole)

7.3.2. Výroba vzorků SFT

Vzorky *SFT* únavy (*obr. 92, 93, 94*) byly vyrobeny dvěma naprosto odlišnými způsoby výroby (důvodem bylo porovnání vlivu výroby, na výsledky meze únavy a vzájemné porovnání s klasickými únavovými zkouškami na tradičních tělesech):

- 1) Jedna sada vzorků byla zhotovena vodním paprskem ve firmě AWAC s.r.o. Nejprve byl vzorek cca 290 mm délky, 60 mm šířky, 8 mm tloušťky frézován, poté broušen na rovinné brusce. Do firmy AWAC byl dodán plech tloušťky 1,2 mm, z kterého byly následně vyřezány *SFT* vzorky.
 - 2) Druhá sada byla vyrobena klasickými způsoby obrábění (soustružení, frézování). Nejprve byla vyrobena hřídel průměru 15 mm, poté vyfrézovány rádiusy po obou stranách, nakonec byly vzorky nařezány na cca 1,3 - 1,5 mm a dobroušeny na brusce.
- ad 1)** odhadovaná drsnost zkušebního tělesa na povrchu (v rádiusech) zhotoveném vodním paprskem ve firmě AWAC s.r.o. je $R_a = 1,6 - 2,2 \mu\text{m}$, naměřená drsnost R_a na povrchu tělesa byla ve směru 1: $R_a = 0,18 \mu\text{m} - 0,26 \mu\text{m}$. Ve směru 2: $R_a = 0,42 \mu\text{m} - 0,46 \mu\text{m}$

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise



Obr. 92 Vzorky zhotovené vodním paprskem, označení směrů měření drsnosti povrchu

ad 2) odhadovaná drsnost zkušebního tělesa na povrchu (v rádiusech) zhotoveném frézováním je $R_a = 1,2\mu\text{m}$, drsnost na povrchu tělesa je stejná jako v případě 1

7.3.3. Testovaný materiál P92

Zkoušený materiál P92 je používán pro výrobu parovodů a jejich kolen pro nově budovaný nadkritický tepelný zdroj. Únavové experimenty s touto ocelí nebyly dosud prováděny a úhrnné výsledky budou cennými podklady při hodnocení zbytkové životnosti po 15 letech provozu.

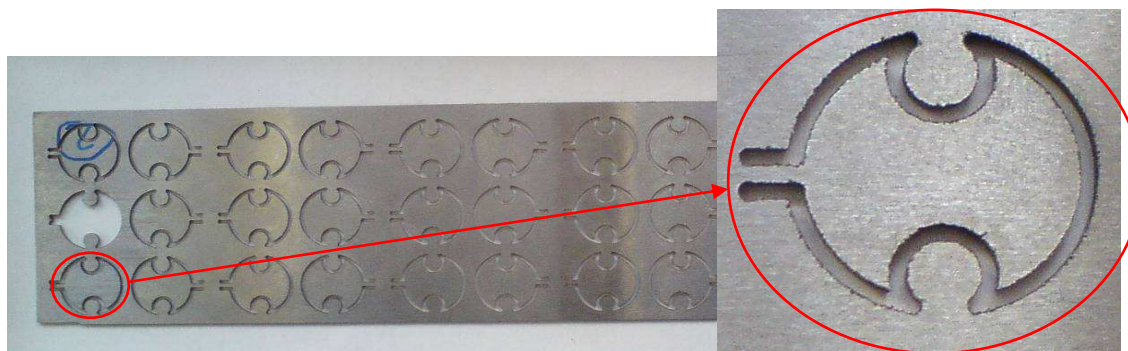
Na základním materiálu byly provedeny zkoušky tahem v příčném a podélném směru (*obr. 103*), kde vzorky 1, 2 jsou v podélném směru a 3, 4 jsou v příčném směru. Hodnoty jsou pro oba dva směry téměř identické. Fotky mikrostruktury také potvrdili, že se jedná o velice homogenní materiál.

Chemické složení oceli P92 v %

Tab. 16 Chemické složení oceli P92

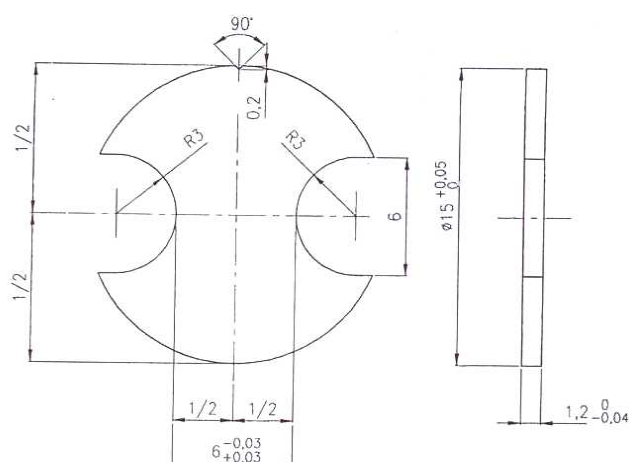
C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni	Mo	V	Nb/Co	N	W	B
0,091	0,191	0,194	0,011	0,002	0,007	8,67	0,172	0,497	0,192	0,058	0,056	1,54	0,0025

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise



Obr. 93 Vzorky zhotovené vodním paprskem z polotovaru desky o tloušťce 1,2 mm

Byly provedeny zkoušky únavy na klasických tělesech při různých asymetriích cyklů. Zkušební tyče mají v nejužším místě průměr 3 mm (**obr. 91**). Celkově bylo odzkoušeno 25 kusů zkušebních vzorků klasických těles.



Obr. 94 Návrh zkušebního tělesa pro SFT dle [27]

7.3.4. Provedení zkoušek únavy

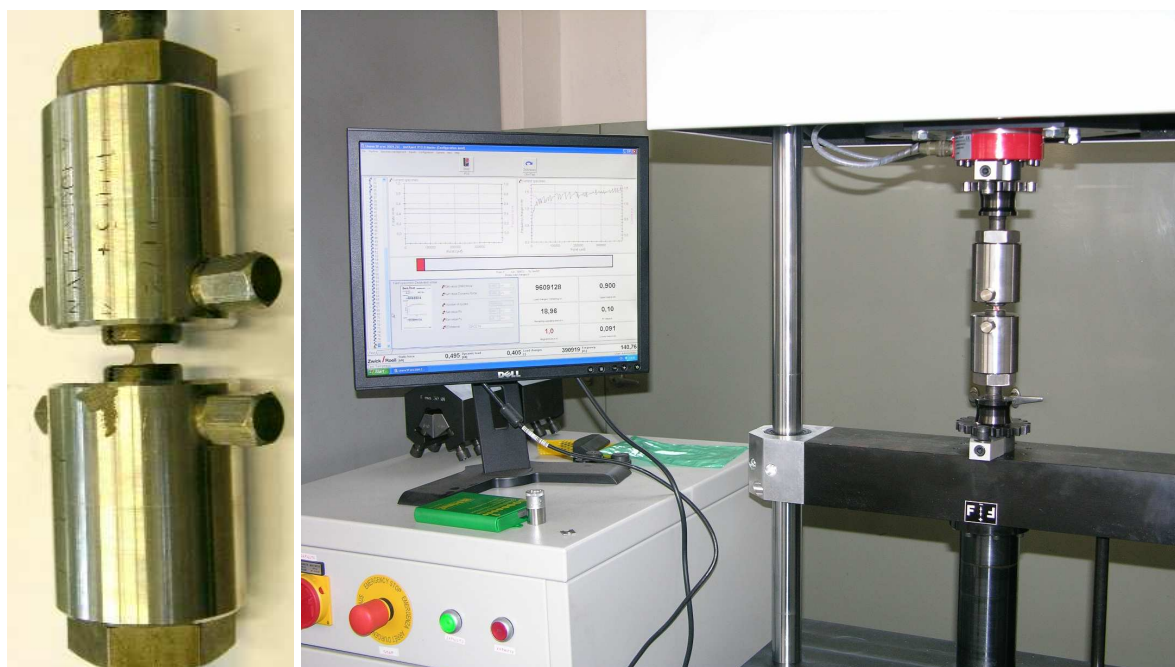
Pro realizaci experimentů v oblasti únavy bylo použito stroje Amsler 10 HFP 5100 – vysokofrekvenčního pulsátoru ZWICK/Roell. Pro uchycení standardních tyčí bylo využito příslušenství tohoto stroje a závity hlav byly přizpůsobeny možnostem tohoto příslušenství (**obr. 95**).

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise



Obr. 95 Zkušební stroj Amsler 10 HFP 5100.
Vlevo detail upnutí standardní zkušební tyče

Pro uchycení vzorků *SFT* únavy byly zhotoveny speciální čelisti (**obr. 96**). Upínací čelisti pro vzorky *SP* [39].



Obr. 96 Princip upnutí vzorků *SFT* [39]

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

7.3.5. Postup zkoušení

Byly provedeny zkoušky cyklickým zatěžováním řízenou silou, s rezonanční frekvencí materiálu ($f=120\text{Hz}$ až 145Hz) s dvěma různými součiniteli asymetrie cyklu ($R=0.1$ a $R=-1$). Smluvní mez únavy byla stanovena na 10^7 cyklů, což odpovídá mezi únavy ocelových materiálů. Zkoušky byly provedeny na standardních i *SFT* únavových vzorcích. Ukázka vzorku po únavovém cyklování je na *obr. 97*.



Obr. 97 SFT vzorek po zkoušce únavy

7.3.6. Výsledky zkoušek

Dále jsou uvedeny výsledky provedených zkoušek na standardních a *SFT* vzorcích.

Na *obr. 98 - 102* jsou uvedeny grafické průběhy tabulkových výsledků v podobě Wöhlerových křivek v semilogaritmickém tvaru ($\sigma - \ln N_f$).

Mez únavy ve tvaru $\sigma_c = \sigma_m \pm \sigma_a$:

Mez únavy pro standardní vzorky při $R=0,1$ byla stanovena $\sigma_c = 358 \pm 293 \text{ MPa}$ (*obr. 100*)

Mez únavy pro *SFT* vzorky při $R=0,1$ byla stanovena $\sigma_c = 274 \pm 224 \text{ MPa}$ (*obr. 100*)

Mez únavy pro *SFT* vzorky při $R=0,1$ u vzorků vyřezaných vodním paprskem byla stanovena $\sigma_c = 270 \pm 221 \text{ MPa}$ (*obr. 101*)

Mez únavy pro standardní vzorky při $R=-1$ byla stanovena $\sigma_c = 0 \pm 390 \text{ MPa}$ (*obr. 99*)

Mez únavy pro *SFT* vzorky při $R=-1$ byla stanovena $\sigma_c = 0 \pm 295 \text{ MPa}$ (*obr. 99*)

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

7.3.7. Diskuse výsledků

Faktor velikosti z rovnice (22) byl zanedbán. Důvodem je přibližně stejná plocha průřezu obou vzorků, přestože množství materiálu na zkušebních vzorcích *SFT* a standardních tyčí je rozdílné. Faktor vrubu byl metodou *MKP* stanoven na 1,33, tedy že

$$\sigma_{SFT,kon} = 1,33 \cdot \sigma_{SFT,nom}, \quad (23)$$

kde $\sigma_{SFT,kon}$ je koncentrace napětí na *SFT* vzorku vlivem vrubu a $\sigma_{SFT,nom}$ je nominální napětí na *SFT* vzorku. Z Wöhlerových křivek (*obr. 99-102*) uváděných pro amplitudu napětí σ_a je patrný rozdíl i po přepočítání nominálního napětí na napětí koncentrované (tedy při uvažování vlivu vrubu, $\sigma_a = \sigma_{SFT,kon}$).

Bylo zkoumáno, zda je tento rozdíl ovlivněn kvalitou povrchu (vliv výroby) nebo zda se jedná o vliv chování daného materiálu. Pro účely srovnání vzorků únavových zkoušek s různou hrubostí povrchu byly použity výsledky *SFT* vzorků vyrobených mechanickým broušením jako jedna série a dále vyřezáním vodním paprskem pro druhou sérii vzorků.

Z *obr. 101* je patrný větší rozptyl výsledků u počtu cyklů do lomu na vzorcích vyřezaných vodním paprskem. Z *obr. 93* je vidět, že vzorky jsou vyrobeny z poměrně velké plochy materiálu a tedy rozptyl výsledků může být do značné míry ovlivněn mírnou nehomogenitou materiálu na rozdíl od broušených kusů, které jsou řezány z jedné tyče a kde vzájemná vzdálenost zkoumaných míst jedné série je minimální. Na druhou stranu vliv hrubosti povrchu nelze zanedbat a rozptyl výsledků bude s největší pravděpodobností kombinací obou zmiňovaných vlivů (kvality povrchu a mírné nehomogenity materiálu).

Přes rozptyl výsledků se stanovená mez únavy liší o méně než 5 MPa a vliv výroby vodním paprskem na stanovení meze únavy je zanedbatelný. Pokud porovnáme zkoušky provedené pro ocel P92 a materiál uvedený na *obr. 107* [53], lze rozdíl ve Wöhlerových křivkách přisuzovat chování materiálu.

Porovnání výsledků únavy mezi standardními a *SFT* vzorky bylo provedeno na dvou sériích nejčastěji používaných součinitelů asymetrie ($R=0,1$ a $R=-1$). Obecně lze říci, že šikmá větev Wöhlerovy křivky je u *SFT* vzorků oceli P92 mnohem strmější a mez únavy je nižší, než by se při prostém přepočtu nominálního napětí na koncentraci napětí dalo očekávat.

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

Pro shodný součinitel asymetrie cyklu vykazují výsledky standardních únavových testů versus výsledky *SFT* vzorků stejné poměry. Pro součinitel asymetrie $R=0,1$ je poměr meze únavy standardních zkoušek k mezi únavy *SFT* zkoušek 1,31. Pro součinitel asymetrie $R=-1$ je poměr meze únavy standardních zkoušek k mezi únavy *SFT* zkoušek 1,32. To je velmi dobrá shoda, kterou je možné využít pro hodnocení únavy pomocí *SFT* vzorků a stanovený poměr brát jako materiálový korelační vztah pro ocel P92.

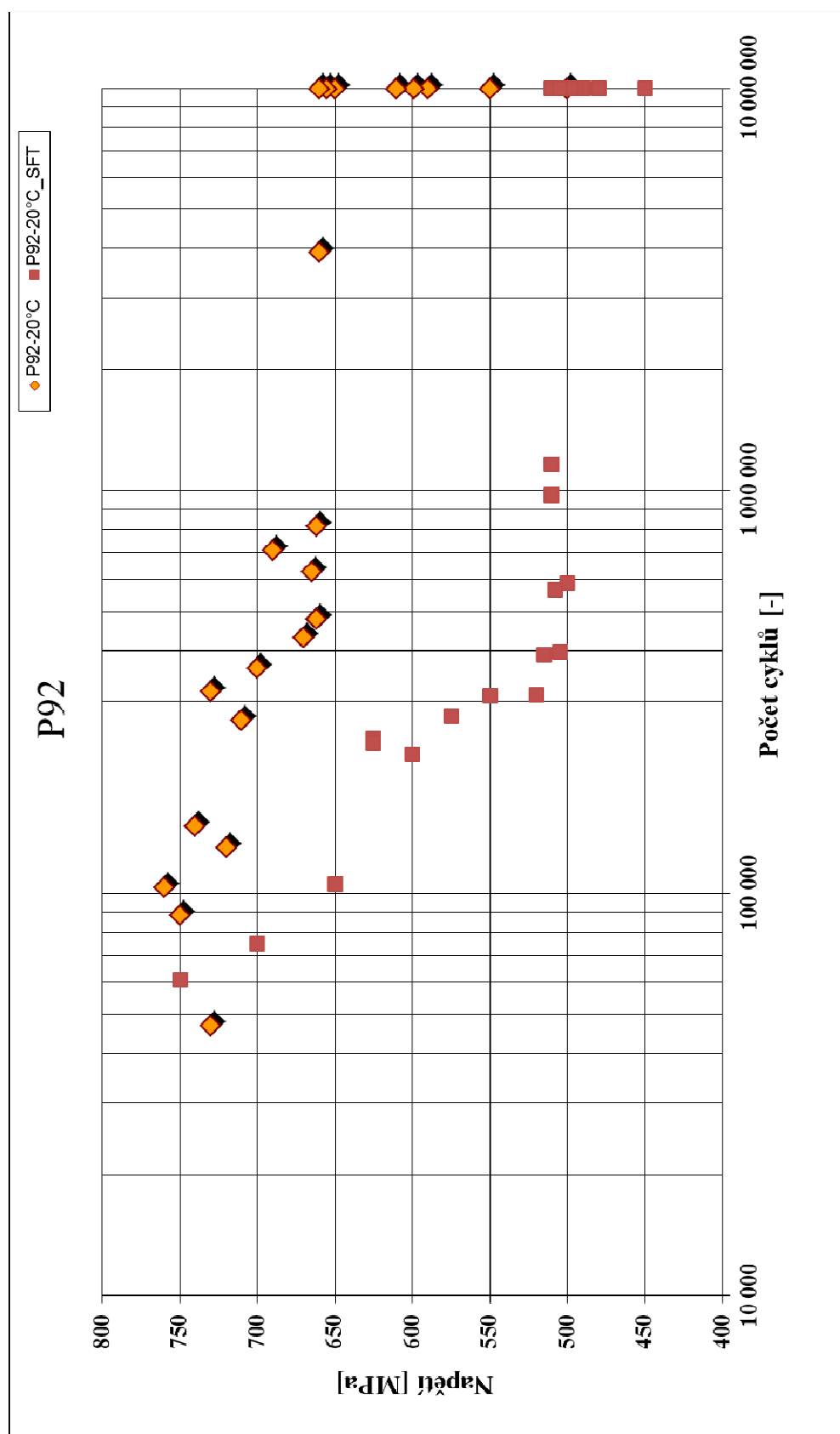
Porovnání šikmých větví Wöhlerových křivek bylo provedeno jen graficky a zatím nebyly získány použitelné korelační vztahy.

7.3.8. Zhodnocení únavových testů materiálu P92

Byly provedeny únavové zkoušky na oceli P92 při dvou různých součinitelích asymetrie cyklu. Byly zjištěny korelační vztahy pro stanovení meze únavy, které jsou téměř stejné pro různá R . Byl zkoušen vliv hrubosti povrchu vrubů *SFT* vzorků. Tento vliv se z hlediska použitých způsobů výroby jeví jako zanedbatelný. Budeme-li v budoucnu provádět odběry vzorků *SPT*, lze tedy bez jakýchkoli rizik ovlivnění výsledků výrobou zvolit vodní paprsek, který je pro odběrný kus materiálu lepším řešením než strojní obrábění.

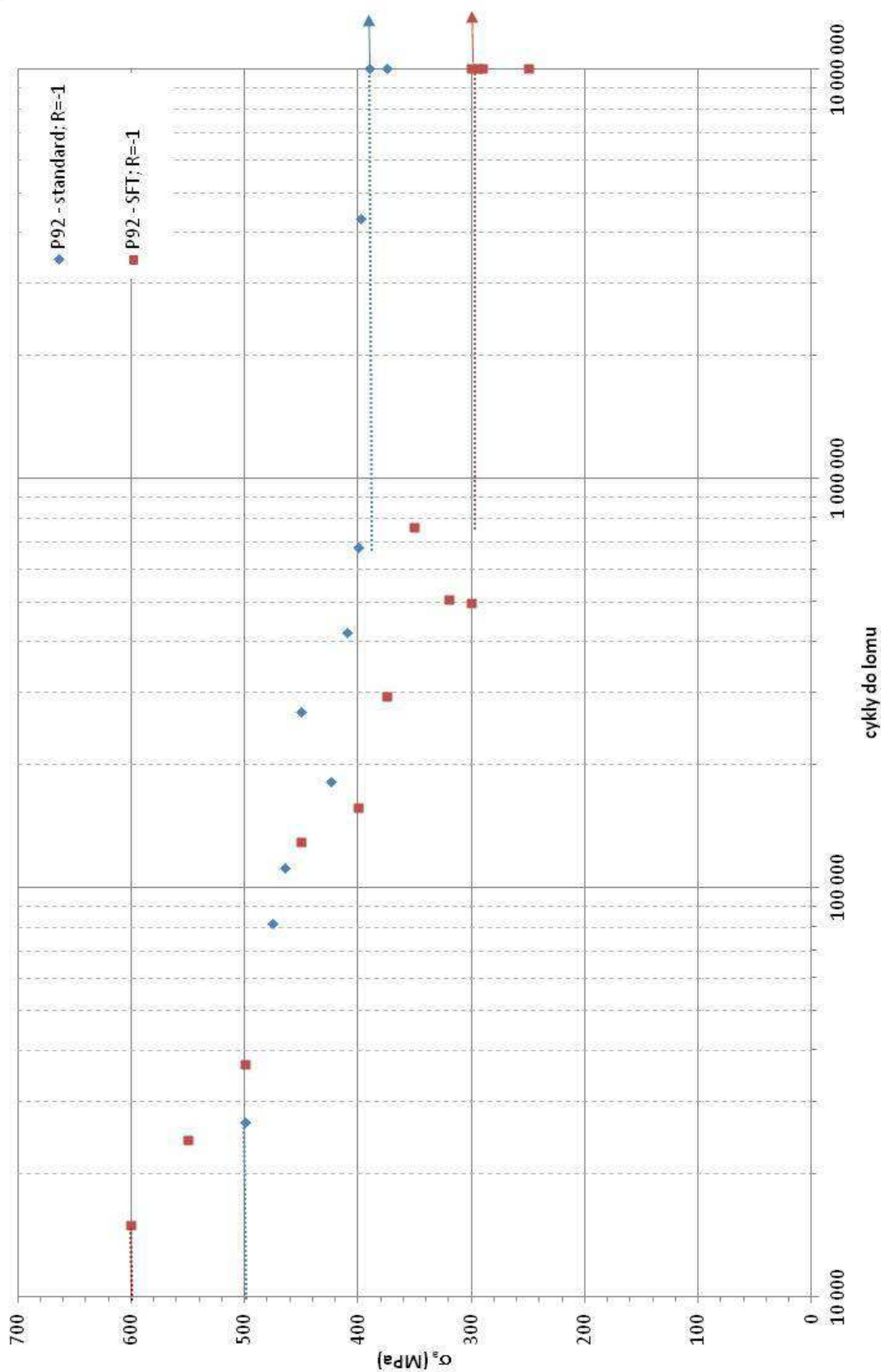
Pro další zkoumání vztahů standardních a *SFT* vztahů je doporučeno, aby materiál P92 byl vystaven tepelnému zpracování (pokud možno používanému v průmyslu) a aby byly provedeny zkoušky o stejném rozsahu pro zjištění, zda se zjištěný materiálový korelační koeficient zachovává i po tomto zpracování [53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62].

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise



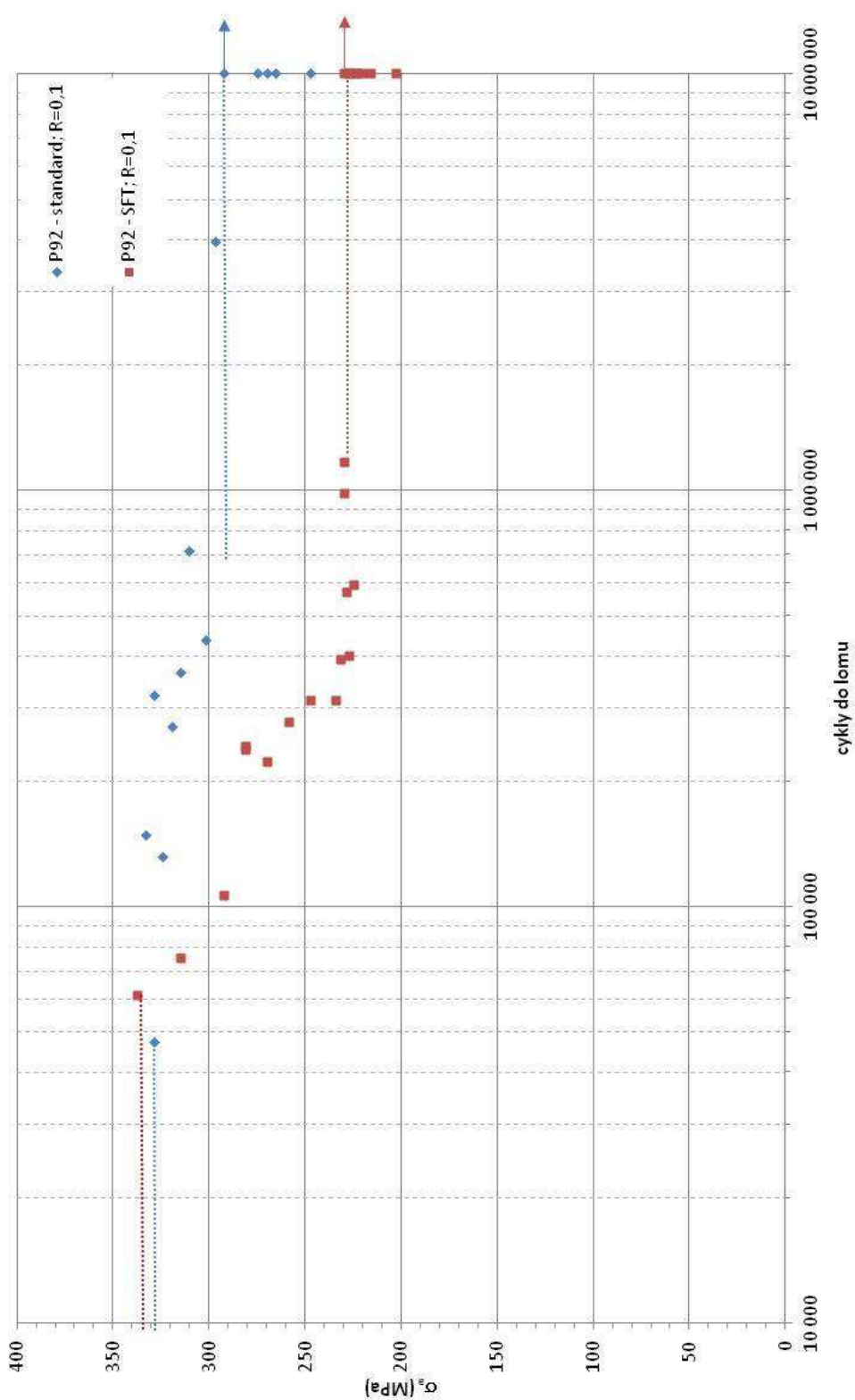
Obr. 98 Wöhlerovy křivky oceli P92, porovnání standardních a SFT vzorků při $R=0,1$ [54]

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise



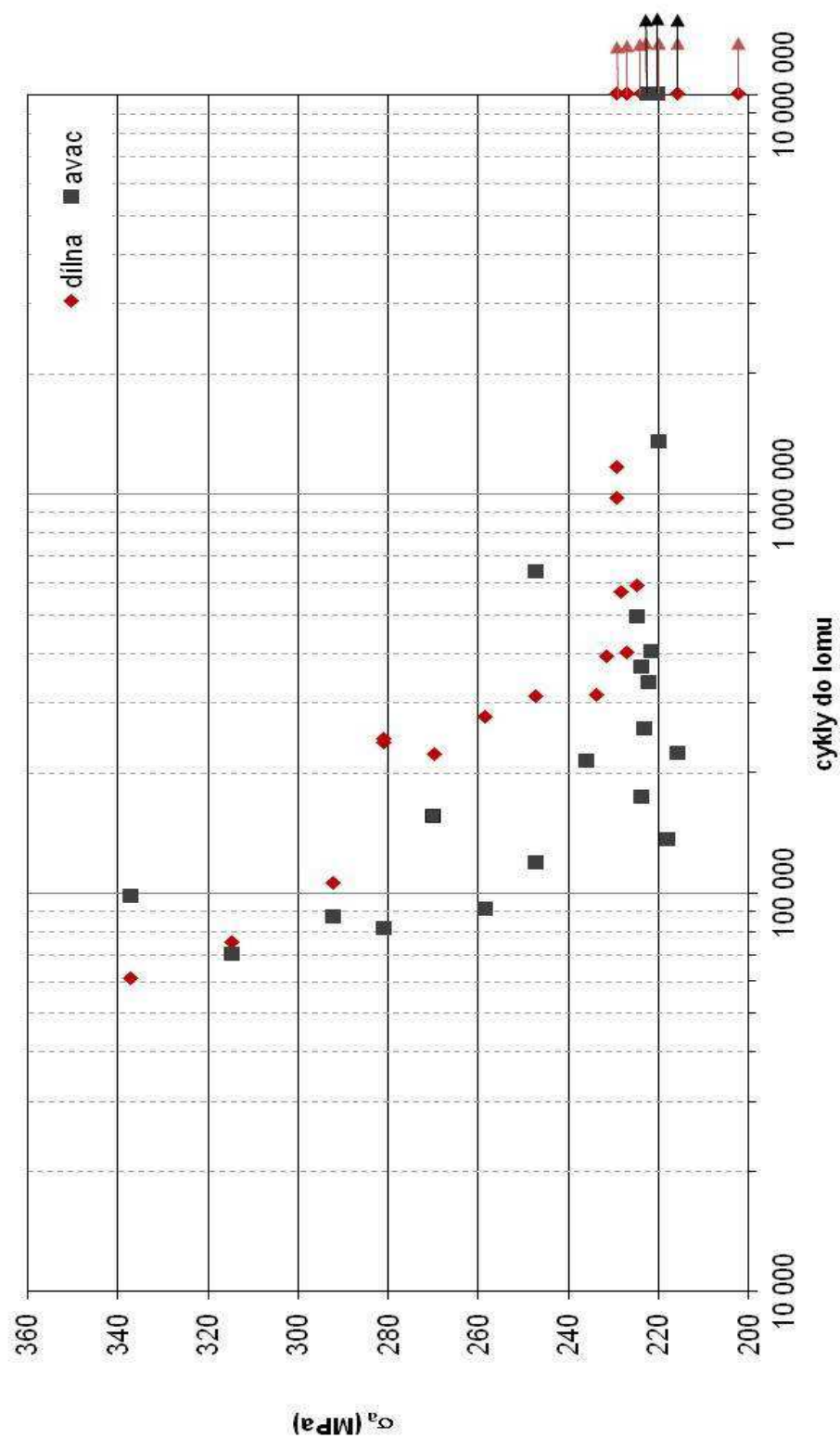
Obr. 99 Wöhlerovy křivky oceli P92, porovnání standardních a SFT vzorků při $R=-1$ [54]

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise



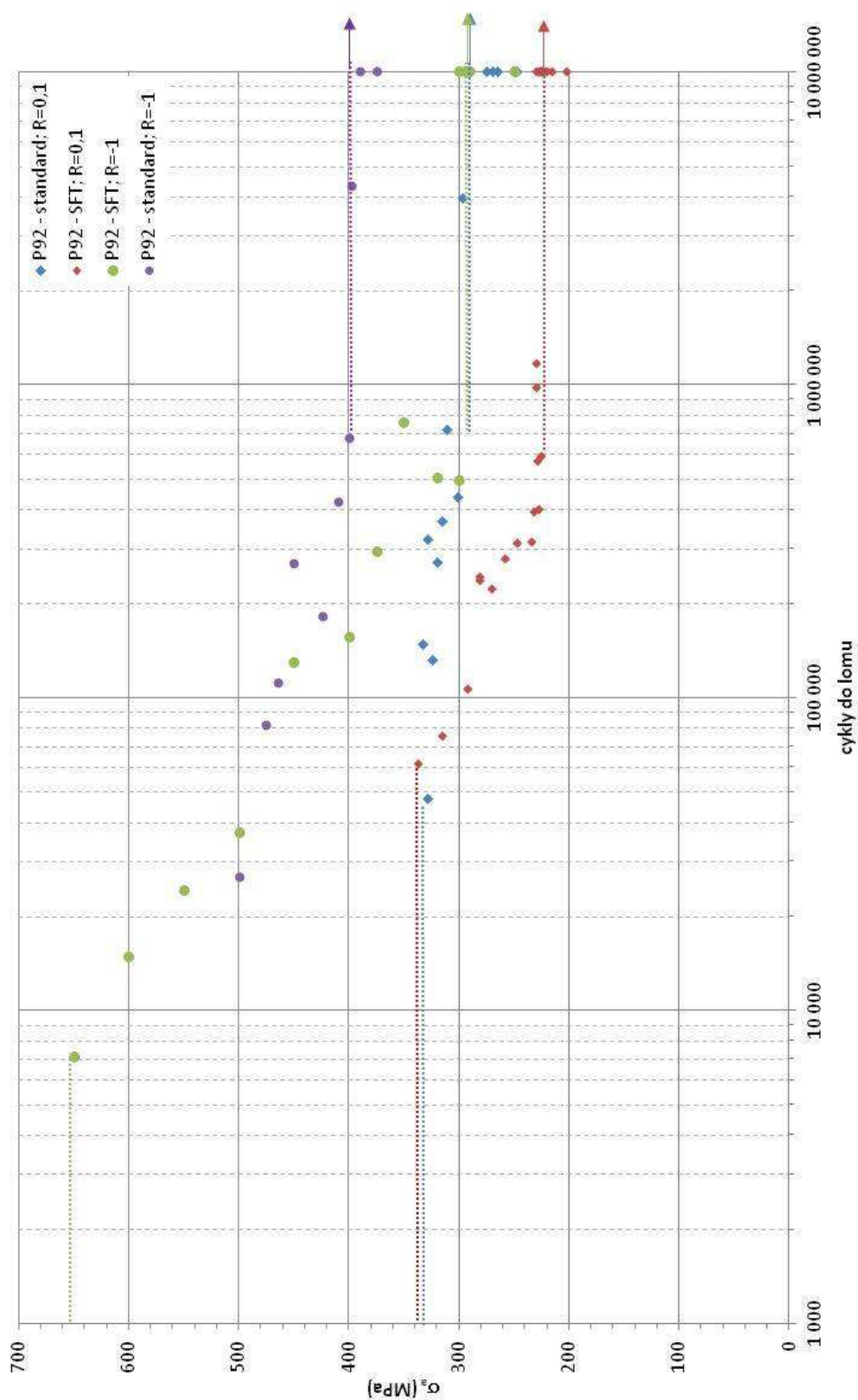
Obr. 100 Wöhlerovy křivky oceli P92, porovnání standardních a SFT vzorků při $R=0,1$ [54]

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise



Obr. 101 Wöhlerovy křivky oceli P92, porovnání SFT vzorků při $R=0,1$ vyrobených vodním paprskem a vzorků vyrobených standardním frézováním a soustružením [54]

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise



Obr. 102 Wöhlerovy křivky oceli P92, obecné porovnání standardních a SFT vzorků při $R=-1$ a $R=0,1$ [54]

Zwick / Roell Simple standard protocol

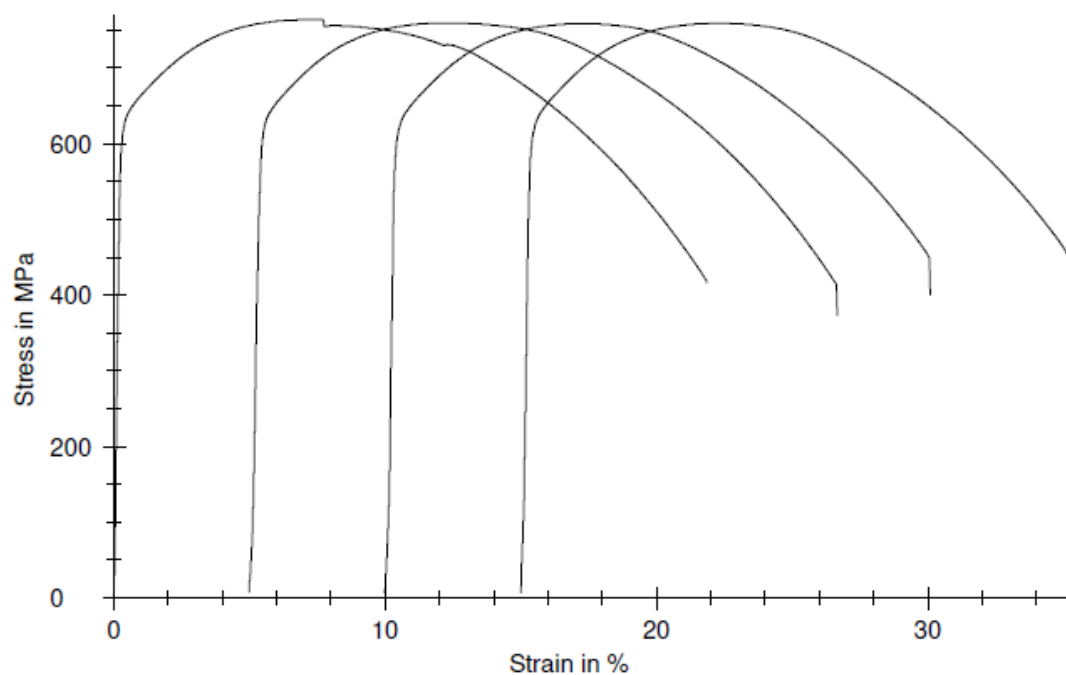
Parameter table: emise_trhacky_6mm.ZSE

Customer	: DAKEL	Load cell	: 250 kN
Tester	: Volak_Slunecko	Extensometer	: Multisens
Material	: P92_1,2,3,4	Specimen grips	: Hydraulic
Test standard	: EN 10002-1	Type of test	: Tensile
Protocol no.	: AKUSTICKA EMISE		
Methodics	: PM27, PM5		

Results:

Nr	Označení	Diameter d0 mm	S0 mm ²	L0 mm	E-Modulus MPa	Rp 0,2 MPa	Rm MPa	A %
1	P92_1	6,009	28,36	30,00	250145	634	764	21,7
2	P92_2	6,008	28,35	30,00	213970	627	760	21,4
3	P92_3	6,008	28,35	30,00	236964	626	759	19,8
4	P92_4	6,008	28,35	30,00	241598	624	759	19,9

Series graphics:



Obr. 103 Výsledky zkoušek tahem materiálu P92 [47]

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

7.3.9. Testovaný materiál 15CH2NMFA

Chemické složení oceli 15CH2NMFA:

Jedná se o materiál, který se používá pro výrobu tlakových nádob.

Tab. 17 Chemické složení ocele 15CH2NMFA

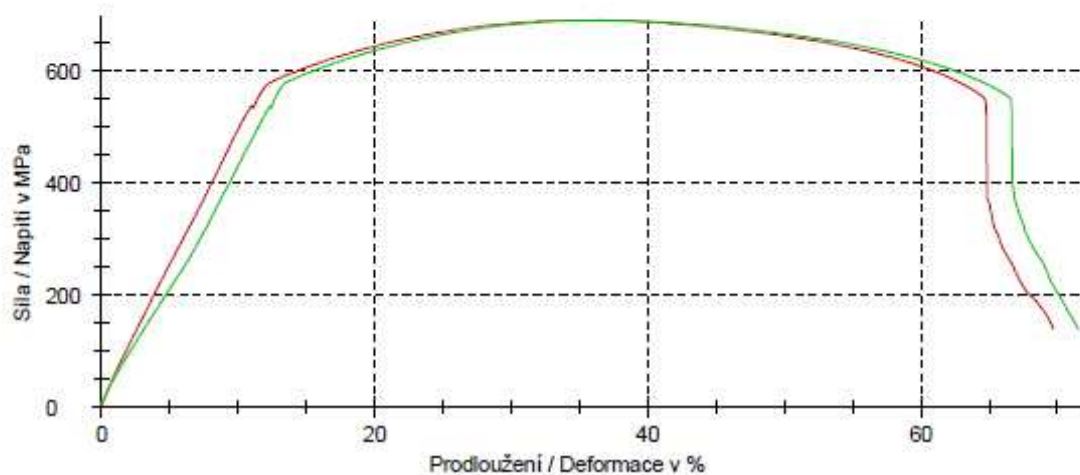
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Co	As
0,13- 0,18	0,17- 0,37	0,3- 0,6	0,02	0,02	1,8- 2,3	1,0- 1,5	0,5- 0,7	max 0,12	max 0,15	max 0,03	max 0,04

Zákazník : Zkoušel(a) : Štengl
 Číslo protokolu : 15CH2NMFA Zkušební systém : PM5 Zwick 250 kN, PM27, PM53
 Zkušební norma : ČSN EN ISO 6892-1
 Předzátížení : 5 MPa Rychlost v oblasti kluzu : 0,0025 1/s
 Rychlost pro E-Modul : 10 MPa/s Rychlost zkoušky : 0,0065 1/s
 Rychlost do meze kluzu : 0,00025 1/s

Výsledky zkoušek:

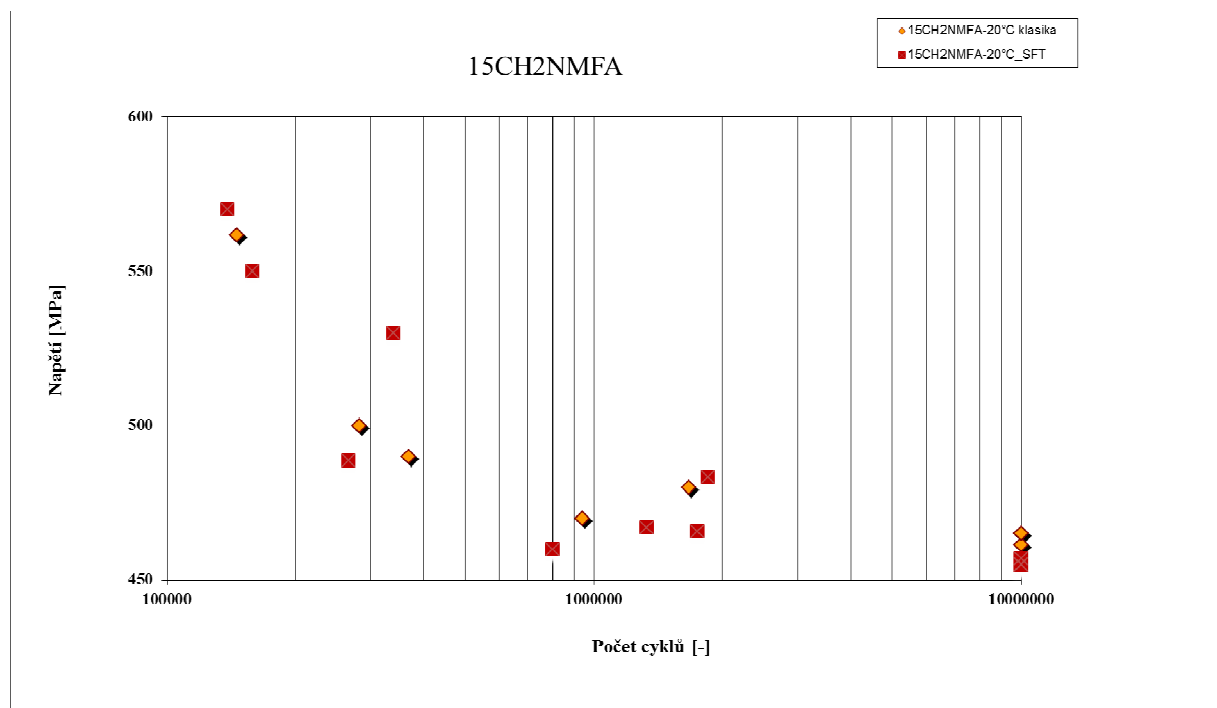
Nr	Vzorek ozn.	a ₀ mm	b ₀ mm	S ₀ mm ²	R _{eH} MPa	R _{p0.2} MPa	R _m MPa	A %	Poznámky
1	1	2,95	19,8	58,41	538	535	691	67,1	
2	2	3,00	19,85	59,55	536	534	691	67,7	

Grafické záznamy série:



Obr. 104 Výsledky zkoušek tahem materiálu 15Ch2NMFA

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

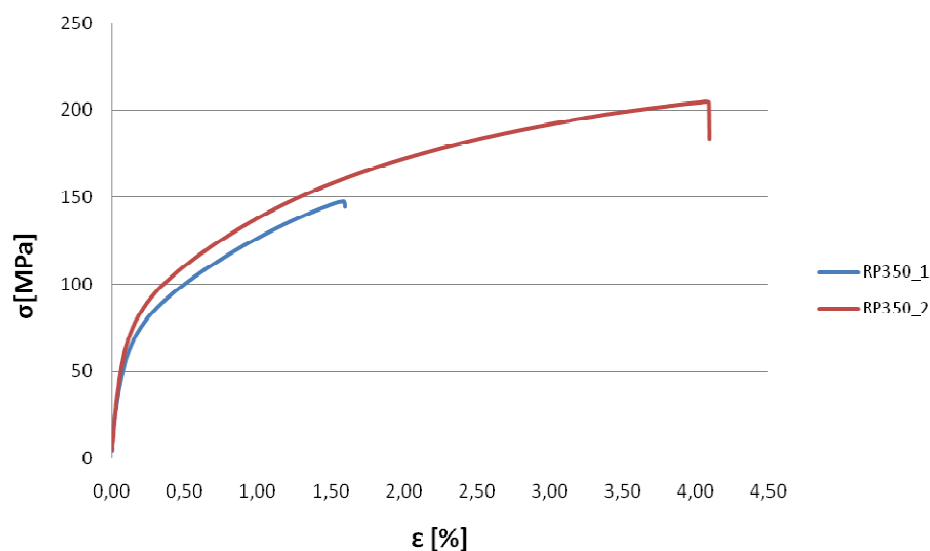


Obr. 105 Wöhlerovy křivky oceli 15CH2NMFA, porovnání standardních a SFT vzorků při $R=0,1$ [55]

Tab. 18 Výsledky zkoušek tahem materiálu RP350 [53]

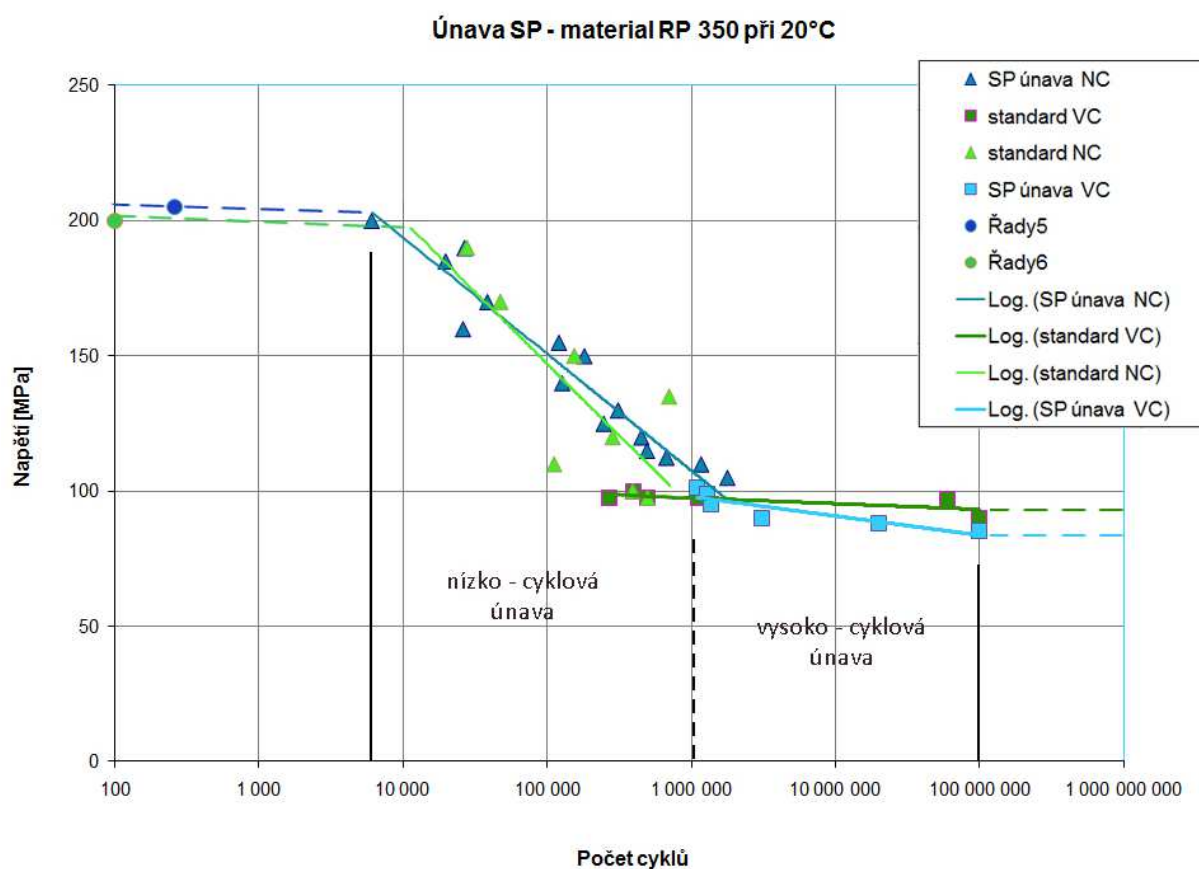
Materiál	S_0 [mm ²]	L_0 [mm]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]
RP350_1	76,98	50	89	148	1,4
RP350_2	79,49	50	97	205	3,9

RP350 zkouška tahem



Obr. 106 Výsledky zkoušek tahem materiálu RP350 [53]

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise



Obr. 107 Wöhlerovy křivky materiálu RP 350 porovnání standardních a SFT vzorků při $R=0,1$ [53]

7.3.10. Zhodnocení

Byly provedeny zkoušky únavy materiálů 15CH2NMFA (*obr. 105*) a RP 350 (*obr. 107*). Mez únavy standardních vzorků versus mez únavy vzorků *SFT* je po uvažování koncentrace napětí identická. Úhrnné výsledky budou cennými podklady při hodnocení zbytkové životnosti po 15 letech provozu.

7.4. Sledování růstu únavových trhlin pomocí akustické emise a elektrického potenciálu

7.4.1. Zkušební aparatura pro měření AE a elektrického potenciálu

Pro měření veličin akustické emise byla použita čtyř-kanálová zkušební aparatura XEDO. Systém Daemon (hardwarová část „XEDO“ + softwarová část „Daemon“), je moderní a výkonné zařízení pro měření a vyhodnocení parametru akustické emise, které umožňuje rovněž měření jiných fyzikálních veličin. Vhodnou kombinací měřících kanálových jednotek *AE* a jednotek pro měření napětí je možné sestavit konfigurace vyhovující požadavkům celé řady aplikací. Zařízení Daemon takto nachází uplatnění jako monitorovací systém *AE* a jeho externích parametrů (tlak, teplota, apod.) a rovněž jako měřící systém napěťových veličin. Měřící jednotky systému jsou řazeny do měřících rámu - boxu, kde jsou spolu s komunikačními jednotkami připojeny na společnou sběrnici. Standardní komunikační rozhraní ethernet 10Base2 umožňuje propojení libovolného počtu boxů s libovolným počtem počítačů. Z komponentů zařízení tak lze sestavit jak malé laboratorní přístroje, tak rozsáhlé průmyslové diagnostické systémy. Snímače systému jsou schopny plnit také funkci vysílačů/budičů a systém Daemon může být vybaven také elektronickým generátorem vhodných pulsů pro simulaci emisních událostí. Takto je umožněná jednoduchá kontrola funkce snímačů a autokalibrace zařízení. Největší předností systému Daemon je to, že kromě hodnocení klasických parametru AE umožňuje rovněž vzorkování signálu na každém kanálu [41].

Dále byl používán měřící systém Dakel-IPL s kontinuálním vzorkováním čtyř kanálů a souvislým ukládáním navzorkovaných dat do paměti PC od firmy DAKEL, která patří k předním výrobcům systémů v oblasti akustické emise. Pro diagnostiku vznikající trhliny ve zkoušeném vzorku potenciálovou metodou byl použit měřící přístroj SRT-KK.2 firmy Labtech. [41].

7.4.2. Snímače akustické emise

snímač *AE* – mezi nepoužívanější snímače k detekci *AE* vln patří piezoelektrické snímače, které byly použity i v případě našich experimentů

předzesilovače AE – zesiluje primární signál ze snímače **AE** a provádí základní frekvenční filtraci, zesílení od 10 do 60dB

kabelová trasa – prostředek přenosu zesíleného signálu z předzesilovače k měřicímu systému, u krátkých kabelů, cca desítky metrů, je zeslabení (ztráty) signálu minimální, u stovek metrů kabelů dochází k většímu útlumu signálu

7.4.3. Zkušební stroj

Zkoušky byly prováděny na zkušebním hydraulickém stroji MTS 500kN, rok výroby 1974, od firmy MTS Systems Corporation – USA (*obr. 109*), který má maximální kapacitu zatížení $\pm 500\text{kN}$. Posuv a síla tohoto stroje jsou řízeny servo-hydraulickým pístem. Hydraulické čelisti zajišťují upnutí zkušebního vzorku.

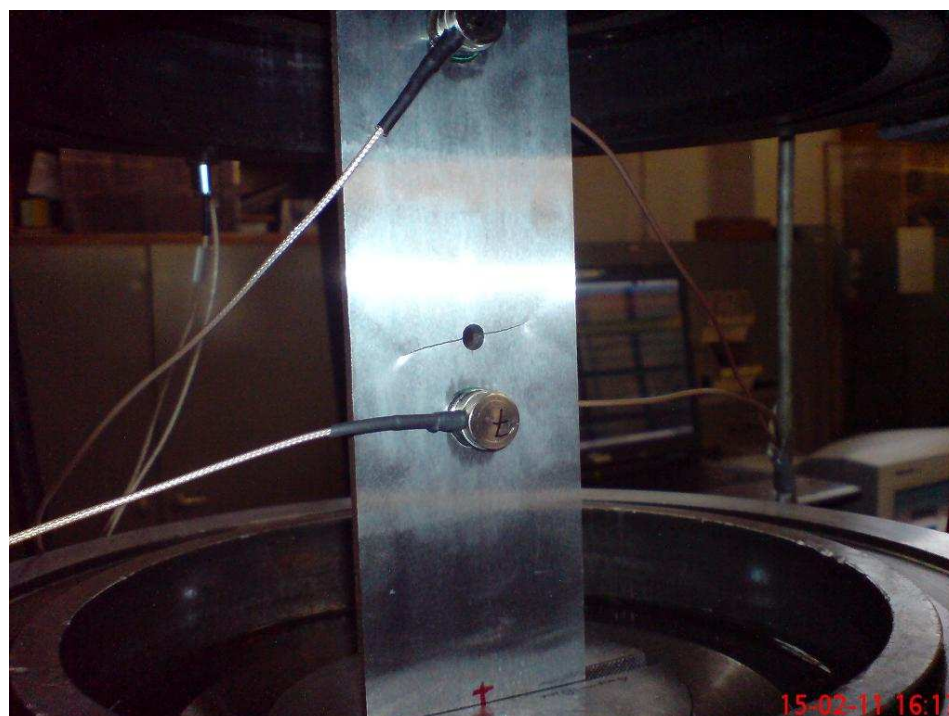
7.4.4. Zkoušený materiál

Zkoušena byla polovina trubky (roury) zkušebního materiálu P92. Tloušťka stěny trubky byla 60mm, délka cca 300mm. Jedná se o materiál, který je v současné době používán v energetickém průmyslu, zejména na potrubí, mezikusy, hrdla, atp. u nadkritických parních turbín. Tato ocel je používána pro výrobu tlakových parovodů v nejmodernějších energetických blocích, pracujících při teplotách až 600°C. Materiál P92 obsahuje (na rozdíl od materiálu P91) až 2% wolframu, což příznivě ovlivňuje zvýšení žárupevnosti. Ve srovnání s materiálem P91, je možno snížit u materiálu P92 tloušťku stěny potrubí o 20%. Díky těmto aspektům byl vybrán pro námi prováděné zkoušky. Vzhledem k množství experimentů, musela být v průběhu řešení této problematiky dodána ještě jedna polovina zkušební trubky P92 [63].

7.4.5. Návrh zkušebního vzorku - materiál P92

Nejprve byl navržen vzorek, který byl cca 300mm dlouhý, 60mm široký, tloušťka 5mm. Uprostřed byl vyvrtán otvor o průměru 5,5mm pro iniciaci trhliny. Výroba tohoto vzorku nebyla náročná (broušení, vrtání). Vzorek byl upnutý v hydraulických čelistech stroje MTS (*obr. 108*). Nad otvorem ve vzdálenosti 50mm byl umístěn snímač akustické emise, pod otvorem ve vzdálenosti 20mm byl umístěn druhý snímač. Provedli jsme několik zkoušek na

těchto tělesech, experimentovali jsme s různými frekvencemi zatěžování od 0,1Hz po 13Hz, ale bohužel ani vzorky, ani frekvence nebyly pro účely experimentů vhodné, neboť docházelo k značnému rušení signálu z hydraulického systému. Pokoušeli jsme se toto rušení odfiltrovat, ale to bylo neúspěšné. Získali jsme tak alespoň základní informace o chování materiálu při nízkocyklové únavě [63].



Obr. 108 Vzorek upnutý do hydraulických čelistí (nevyhovující) [63]



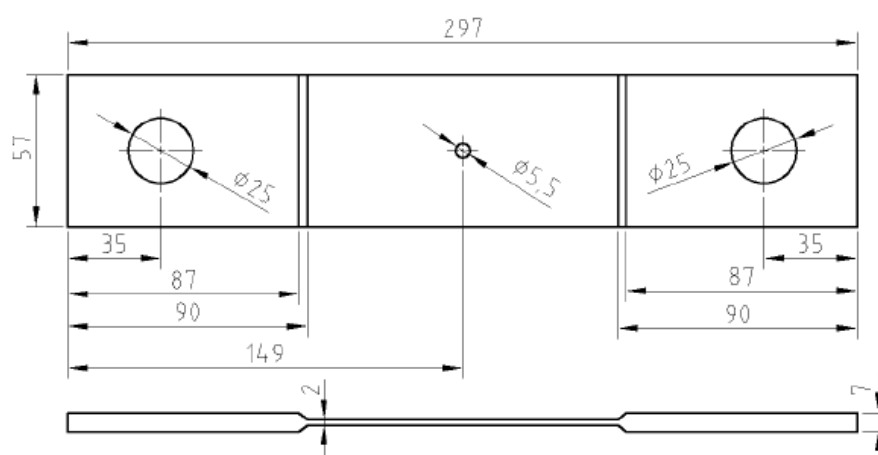
Obr. 109 Zkušební stroj, měřící aparatura DAKEL, ovládací jednotka stroje [63]

Vzhledem k tomu, že nebyl první typ vzorku vhodný, bylo nutné navrhnout jiný. Abychom eliminovali alespoň částečně rušení od hydraulického systému stroje, byly navrženy a vyrobeny speciální čelisti pro uchycení vzorků, které jsou dále upnuty v hydraulických čelistech stroje (**obr. 110**). Do těchto čelistí byl navržen nový typ vzorku. Délka vzorku zůstala stejná, čili cca 300mm, na obou stranách byly vyvrtány otvory průměru 25mm, aby mohl být vzorek uchycen do mechanických čelistí. Otvory průměru 25mm však značně snížily průřez vzorku pro zkoušky únavy. Vzorek jsme tedy uprostřed cca v délce 120mm zúžili na tloušťku 2mm a uprostřed vzorku byl opět vyvrtán otvor o průměru 5,5mm, pro iniciaci trhliny. Výkres vzorku je na **obr. 111** [63].

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise



Obr. 110 Mechanické čelisti upnuté do hydraulických čelistí stroje MTS, detail upnutí vzorku [63]



Obr. 111 Výkres zkušebního tělesa [66]

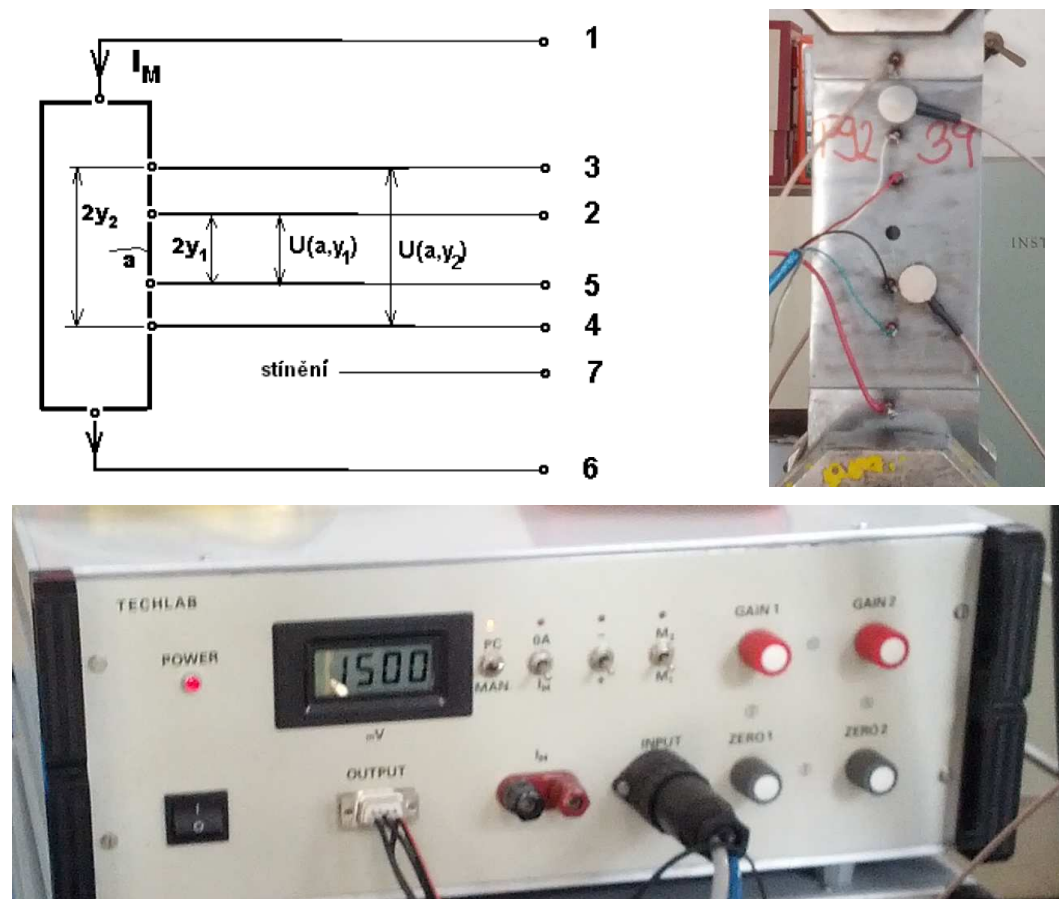
Aby byla dodržena sousost vzorku, byly vyrobeny pryžové podložky a použity ocelové matky. Pryžové podložky jsou umístěny z obou stran vzorku a z obou stran za matkami. Toto zajišťuje minimální rušení signálu akustické emise při zkouškách nízkocyklové únavy. Tento typ vzorku vyhověl našim požadavkům a tak jej používáme při testech doposud. Vzorek je nejprve frézován na tloušťku cca 7mm, poté je broušen na drsnost $R_a = 0,8$, následně jsou

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

vyvrtány otvory, které jsou ještě speciálně doleštěny, neboť nám 2x praskl vzorek v uchycení z důvodu špatného povrchu vyvrtaných otvorů [63].

7.4.6. Diagnostika vzniku trhliny potenciálovou metodou a AE

Metoda měření akustické emise je detailně popsána v teoretické části této práce. Metoda měření elektrického potenciálu využívá závislosti úbytku napětí mezi elektrodami na měřeném vzorku na velikosti trhliny, je-li vzorek protékán konstantním proudem. Pro vyloučení rušivých vlivů je měření uspořádáno podle *obr. 112*.



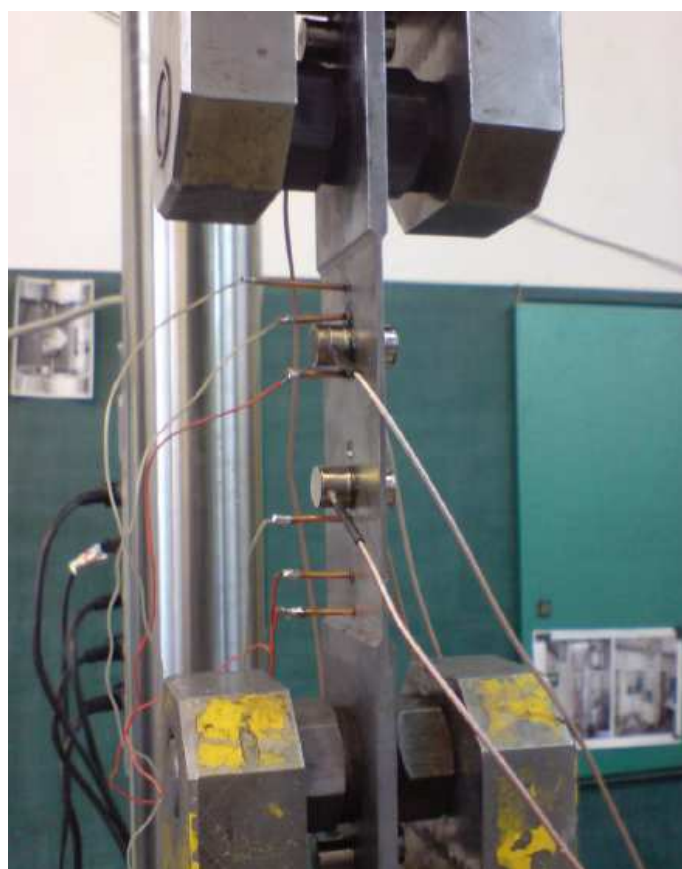
Obr. 112 Uspořádání vzorku pro potenciálovou metodu - vlevo teoreticky, vpravo prakticky, dole používaná aparatura [64]

Do zkušebního vzorku (*obr. 113*) je přiveden elektrický proud elektrodami 1 a 6. Po obou stranách trhliny, označené *a*, jsou umístěny elektrody pro snímání elektrického napětí.

Velikost trhliny a je možné vypočítat podle velikosti obou napětí $U(a, y_1)$, $U(a, y_2)$ a vzdálenosti elektrod:

$$a = \sqrt{\frac{A^2 y_2^2 - y_1^2}{1 - A^2}}, \quad \text{kde } A = \frac{U(a, y_1)}{U(a, y_2)}, \quad (24)$$

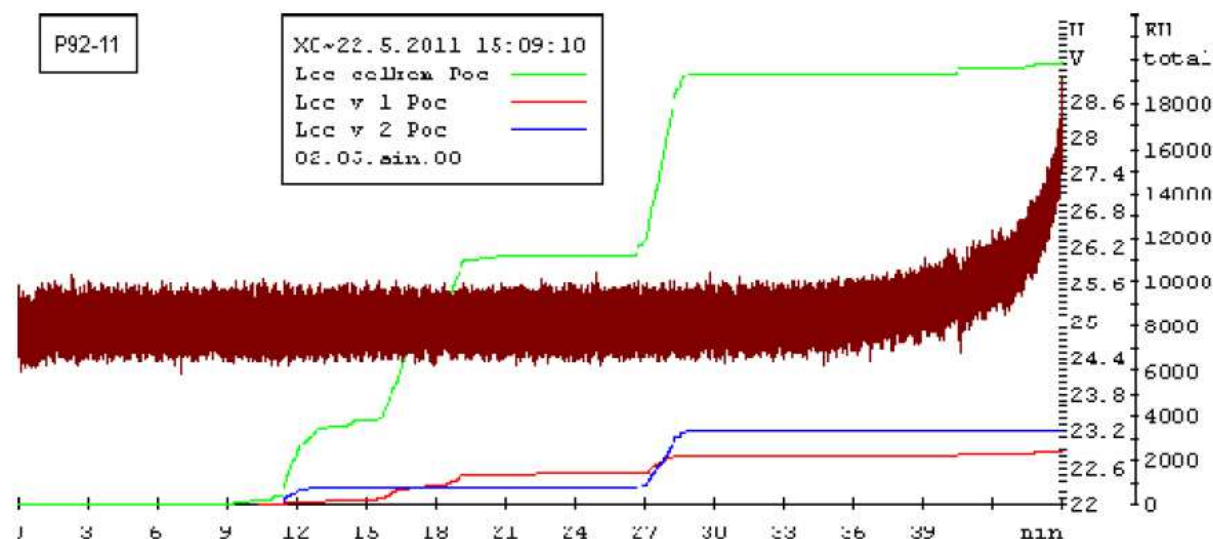
Generování vhodné velikosti měřícího proudu, jeho snímání a výpočet skutečné velikosti trhliny a provádí periodicky podle zadaného programu výše uvedený přístroj SRT-KK.2. Hodnoty naměřených napětí digitalizuje a posílá prostřednictvím kanálu USB do počítače, který ovládá přístroj SRT-KK.2. Současně tyto hodnoty napětí spolu s vypočítanými hodnotami velikosti trhliny ukládá do paměti jako textový soubor. Tento soubor lze importovat do výsledků měření akustické emise a výsledky obou metod je možné snadno porovnat. Na následujícím obrázku je vidět současné umístění snímačů akustické emise a elektrod pro měření potenciálovou metodou na testovaný vzorek: [64]



Obr. 113 Umístění snímačů AE a elektrod pro potenciálovou metodu na měřeném vzorku. Vzorek je upnutý do zkušebního stroje MTS 500 kN v Mechanické zkušebně VZÚ Plzeň

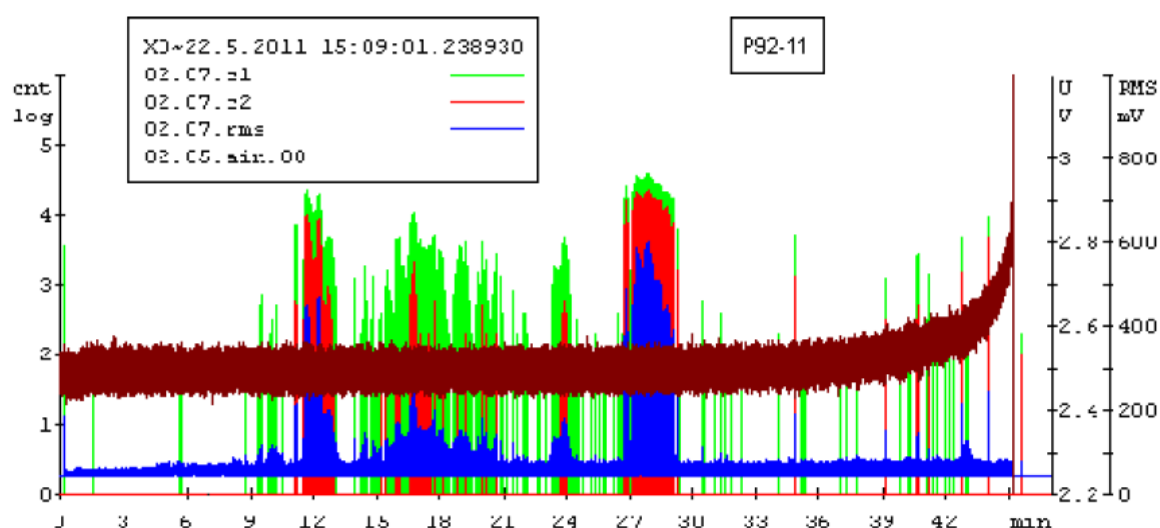
Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

Výše popsaným importem hodnot do grafů *AE* vznikly následující diagramy, dokumentující detekci únavového poškození jednak metodou *AE*, jednak potenciálovou metodou:



Obr. 114 Současné zobrazení výsledků potenciálové metody a *AE* [64]

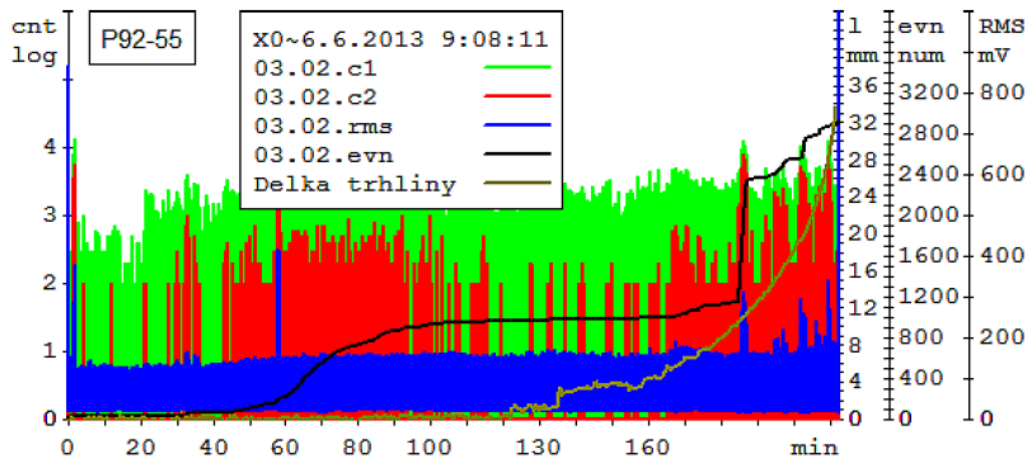
Na *obr. 114* je zobrazena délka trhliny hnědě a výsledky měření *AE* červeně, modře, zeleně. Červeně a modře je zakreslena časová závislost počtu lokalizovaných událostí *AE*, zeleně je zobrazena časová závislost celkového počtu událostí *AE*.



Obr. 115 Současné zobrazení výsledků potenciálové metody a *AE* [64]

Na *obr. 115* je hnědou barvou znázorněna délka trhliny pomocí elektrického potenciálu. *AE* reprezentují barvy červená, modrá a zelená. Červeně a zeleně je zakreslena časová závislost

countů pro 2 různé prahy, modrá křivka ukazuje průběh efektivní hodnoty signálu **AE** (střední kvadratická úroveň detekovaného signálu)



Obr. 116 Záznam počtu událostí **AE** v průběhu cyklického zatěžování oceli P92 [66]

Na **obr. 116** černá barva = sumě *evn* (hitů), hnědá = délka trhliny vyhodnocená potenciálovou metodou, zelená a červená = *county* (překmitům signálu **AE** přes prahy 1 a 2), modrá = efektivní hodnotě signálu **AE**.

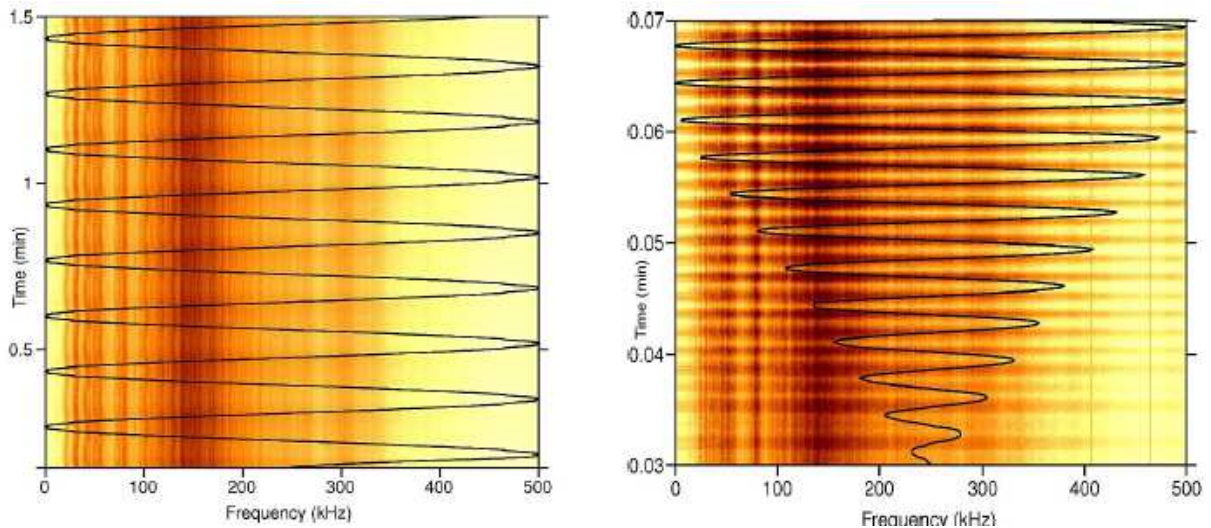
Od cca 50. minuty je na průběhu sumy hitů **AE** dobře pozorovatelný její nárůst v předstihu před indikací trhliny metodou elektrického potenciálu v čase cca 120 minut. Mezi 50. a 120. minutou **AE** zřejmě indikuje preinicializační fázi iniciace trhliny, což je patrné i ze základního parametru *c2*.

Z **obr. 114, 115, 116** jasně vyplývá, že pomocí **AE** je možné odhalit počínající poškození materiálu mnohem dříve, než v něm vznikne makrotrhlina, zjistitelná potenciálovou metodou. V obou případech ukázala **AE** masivní nárůst intenzity akustických vln z poškození materiálu už mezi 9. a 12. minutou testu. Měřitelnou velikost trhliny potenciálovou metodou lze zaznamenat až kolem 35. minuty probíhajícího testu. Oba příklady srovnání potenciálové metody a metody **AE** hovoří jasně ve prospěch **AE** [64].

Potenciálová metoda zjišťování růstu trhliny dává dobré výsledky, ale má zásadní nevýhodu: Aby bylo možné tuto metodu použít, je nutné nejprve zkušební vzorek přetřhnout. Bez toho není možné zkoumat lomové plochy. Je iluzorní zkoušet použitím této metody diagnostikovat počínající poškození materiálu, nebo dokonce zkoušet předpovídat zbytkovou životnost

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

zkoušeného strojního dílu. To vše ale pomocí vhodné analýzy naměřených dat může umožnit metoda, využívající **AE** [65, 66].



Obr. 117 *Spektrogramy z únavových zkoušek materiálu P92 po vyhodnocení FFT [66]*

a) cyklické zatěžování - ustálený stav

b) náběh zatěžování - vzorek s trhlinou

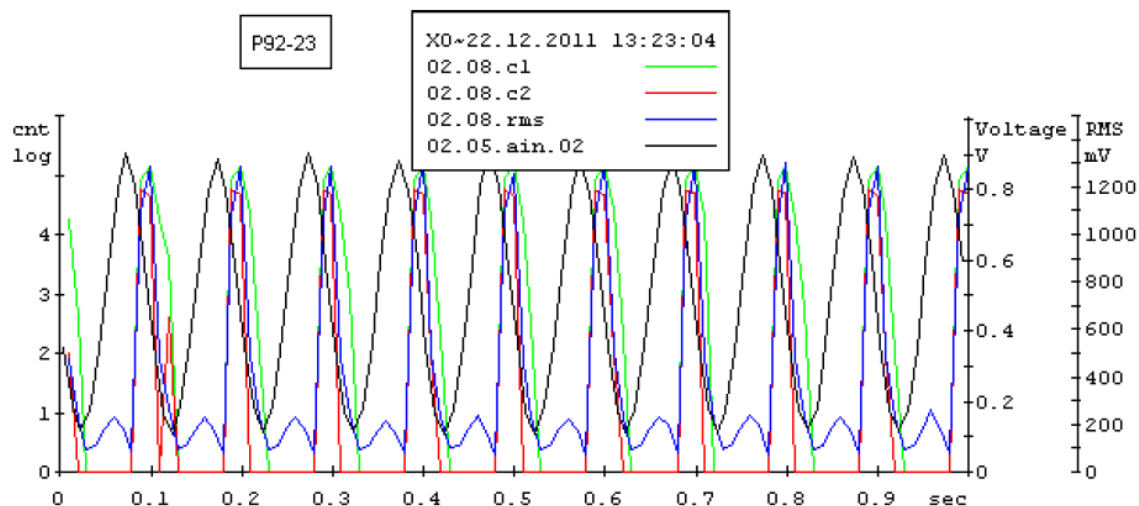
Na vzorku (**obr. 113**) je umístěno 8 snímačů AE a 6 elektrod pro potenciálovou metodu měření růstu trhliny. 4 snímače **AE** byly připojeny na měřící zařízení Dakel-XEDO, další 4 byly připojeny k systému Dakel-IPL s kontinuálním vzorkováním čtyř kanálů a souvislým ukládáním navzorkovaných dat do paměti PC.

Cyklická zatěžovací zkouška probíhala se sinusově proměnným zatížením 0 až 150 kN. Periodická křivka udává průběh síly, amplituda spektra signálu **AE** je vyjádřena barevně: čím tmavší barva, tím větší je amplituda signálu **AE** pro danou frekvenci spektra. Z obrázku je zřejmá masivní amplitudová modulace všech složek **AE**, způsobená průběhem síly na vzorek s trhlinou. Amplituda **AE** je nejvyšší v těch úsecích měření, kde je nejvyšší rychlost změny zatěžovací síly.

Na **obr. 117 a)**, kde není diagnostikována trhlina, je pozorovatelná frekvenční modulace většiny spektrálních čar emitovaného signálu **AE** podle okamžité hodnoty zatížení. Amplituda všech frekvenčních čar se však mění se zatížením jen poměrně málo. Na **obr. 117 b)** je podobná zkouška stejného vzorku po mnoha zatěžovacích cyklech, na kterém byla klasickými laboratorními metodami diagnostikována začínající trhlina. Vyšší amplitudy emisních čar jsou

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

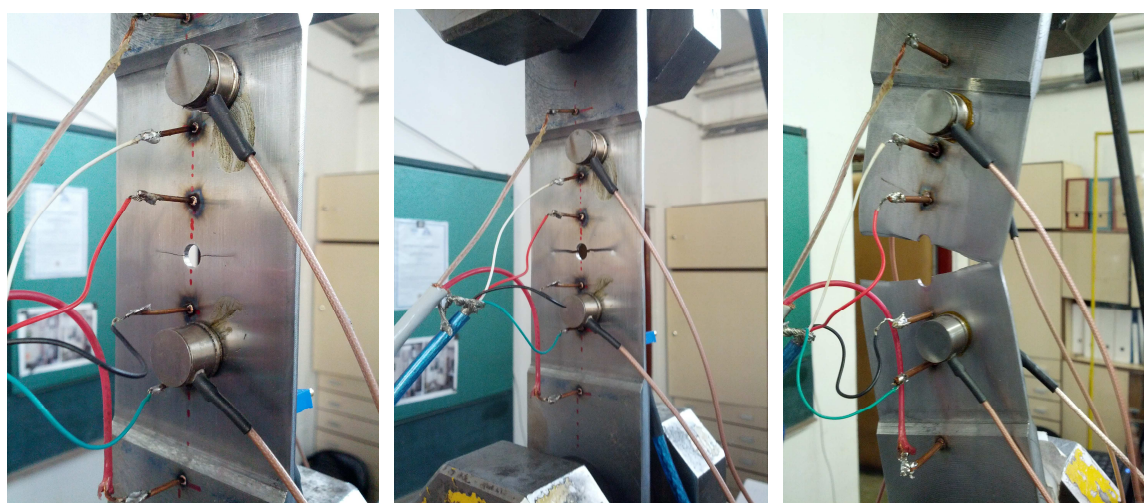
částečně způsobeny vyšší frekvencí zatěžování, ale hlavně silnější *AE* z oblasti trhliny [64, 65, 66].



Obr. 118 Krátký detail z měření únavového poškození. Černě je označen průběh zatěžovací síly. Červená a zelená křivka udávají časovou závislost frekvence countů pro 2 různé prahy [66]

Jako základní metoda vyhodnocení signálu *AE* byla nadále používána rychlá Fourierova transformace (Fast Fourier Transformation, *FFT*).

Porovnání výsledků *FFT* s výsledky někdy používané vlnkové (wavelet) transformace vychází ve většině aplikací ve prospěch *FFT*. Postupy, umožňující vlnková transformace jsou někdy ovlivněny druhem zvolených vlnkových funkcí. Při použití vlnkové transformace vzniká určitá nejednotnost interpretace výstupních informací při použití různého tvaru vlnkové funkce [65].



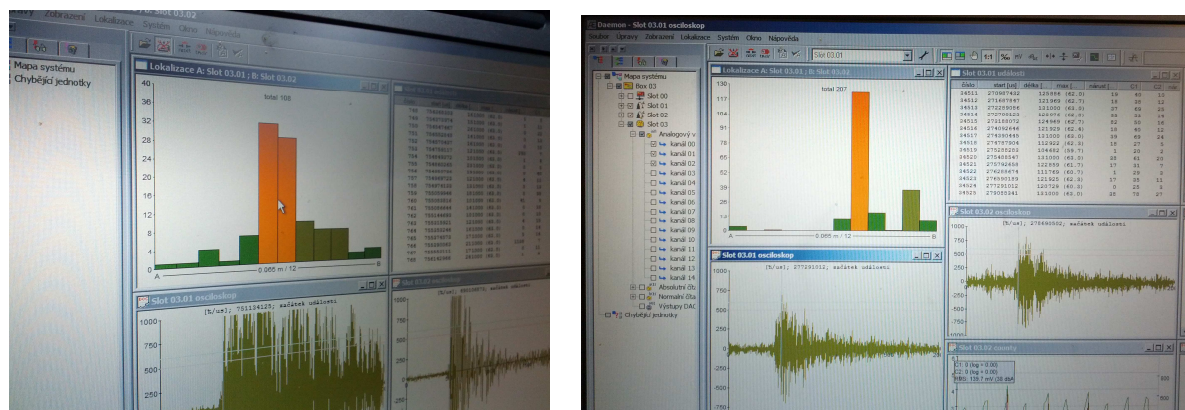
Obr. 119 Zkušební vzorek s trhlinou, snímači akustické emise a elektrodami

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise



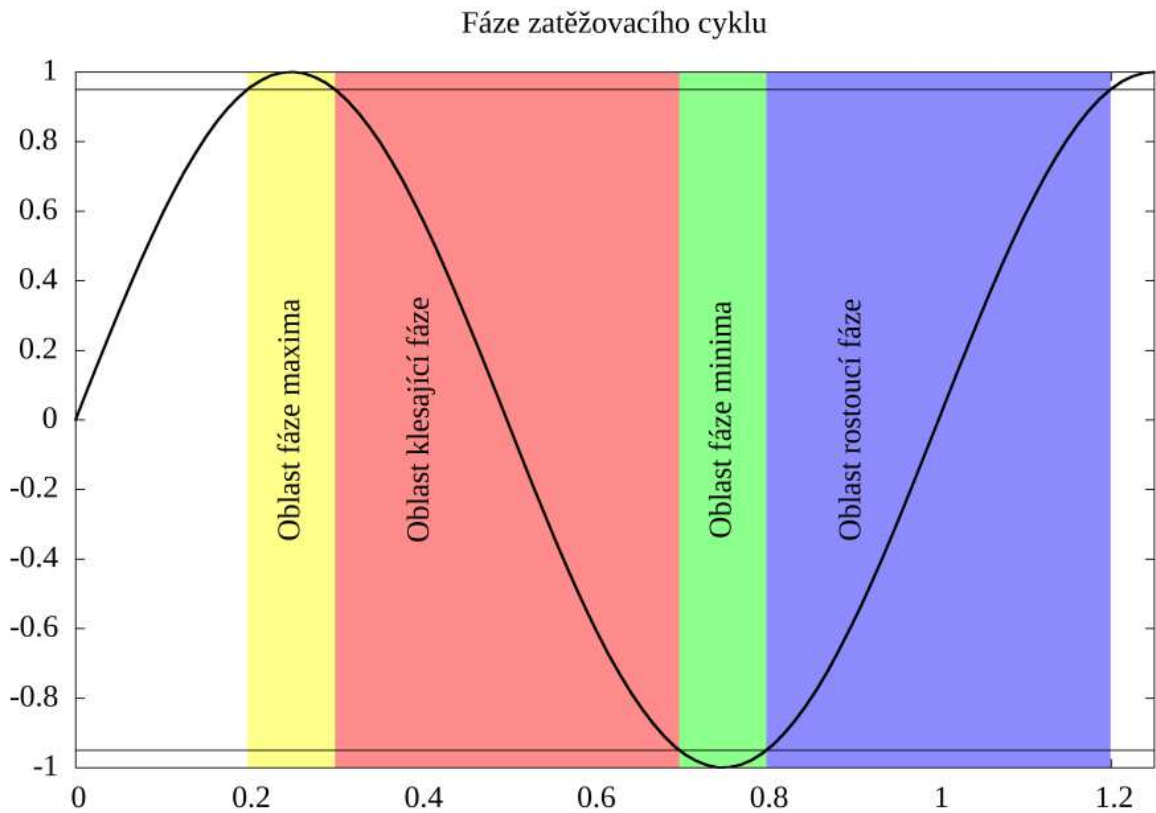
Obr. 120 Výsledek zkoušky tahem - nahoře pohled na přetržený vzorek, dole fotografie vzorku s promítnutou lokalizací emisních událostí podle intenzity signálu AE (ocel P92 - 16) [66]

Na **obr. 120** je dokumentována přesnost lokalizace emisního zdroje, tj. šířící se trhliny. Pro tato měření byla použita aparatura DAKEL-IPL [66].



Obr. 121 Software Daemon pro měření akustické emise (ukázka lokalizace emisních událostí na zkoušených vzorcích)

Analýza fáze hitů AE



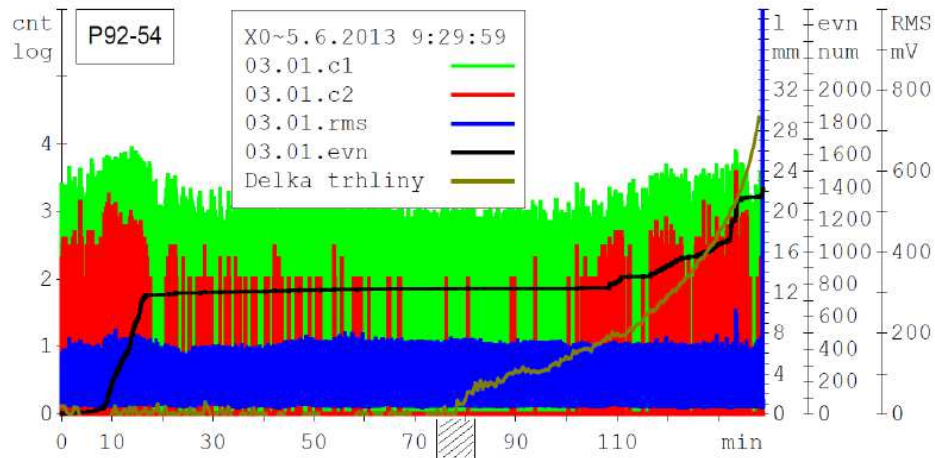
Obr. 122 Definované oblasti fáze na průběhu externí veličiny zachycující cyklické zatěžování zkoumaného vzorku [67]

Při analýze hitů vzniklých v důsledku akustické emise při periodickém zatěžování vzorku se ukazuje, že má smysl separátně analyzovat hity v různých fázích zatěžovacího cyklu. Z pravidla rozlišujeme 4 fáze zatěžovacího cyklu (**obr. 122**): klesající fáze, rostoucí fáze, fáze minima a fáze maxima.

Dělicí body oblastí fáze se počítají tak, že vždy hodnoty dvou po sobě jdoucích extrémů určí měřítko, kde minimum odpovídá hodnotě -100 % a maximum odpovídá hodnotě 100 %. Hranice oblastí jsou pak stanoveny takovými body mezi těmito extrémami, jejichž hodnota odpovídá -95 % a 95 % na **obr. 122** odpovídá hladinám naznačeným horizontálními čarami dole a nahoře, tato hranice je stanovena explicitně). Po nalezení časových značek takových bodů jsou pak tyto časové značky stanoveny jako hranice daných okolních fázových oblastí. Pro provedení fázové analýzy bylo vytvořeno několik softwarových nástrojů [67].

Zpracování diagnostických dat a programové vybavení

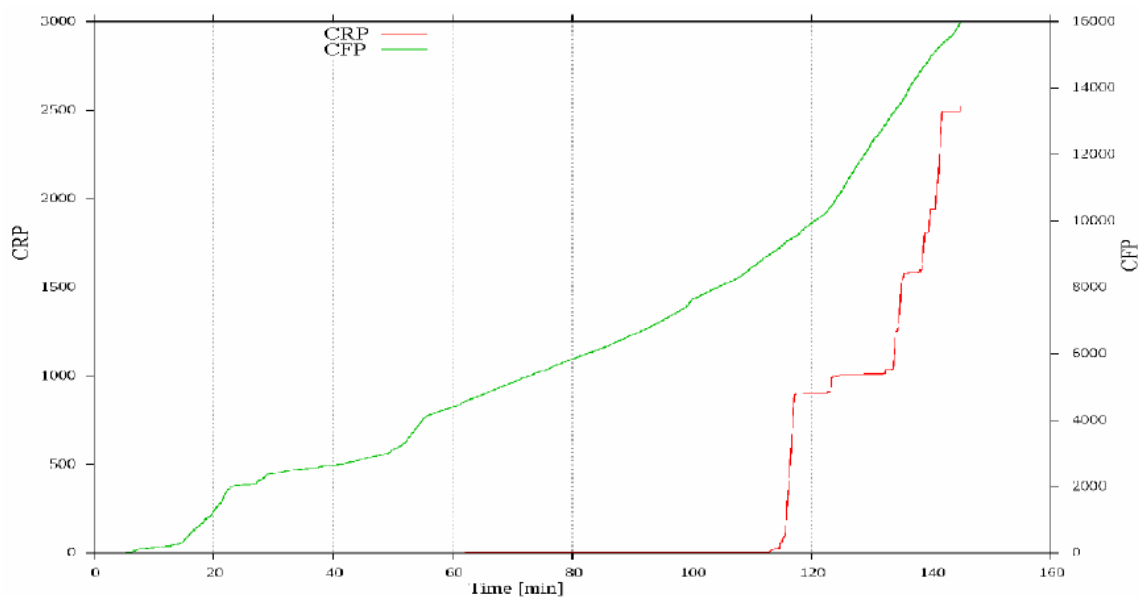
Na základě zkušeností s vyhodnocováním únavových testů v letech 2011 a 2012 řešení, byly prováděny úpravy vyhodnocovacího programového produktu „LibAE“. To bylo umožněno tím, že kompletní vzorkovaná data z únavových zkoušek jsou dlouhodobě archivována na pevných discích. Nad těmito daty byly prováděny rozsáhlé numerické simulace. Opětovným vyhodnocením naměřených dat, umožnilo definovat a stanovit parametry **CRP** – rostoucí fáze hitů, **CFP** – klesající fáze hitů, **C_{Ma}** – kumulace hitů v maximální fázi a **C_{Mi}** – kumulace hitů v minimální fázi [67].



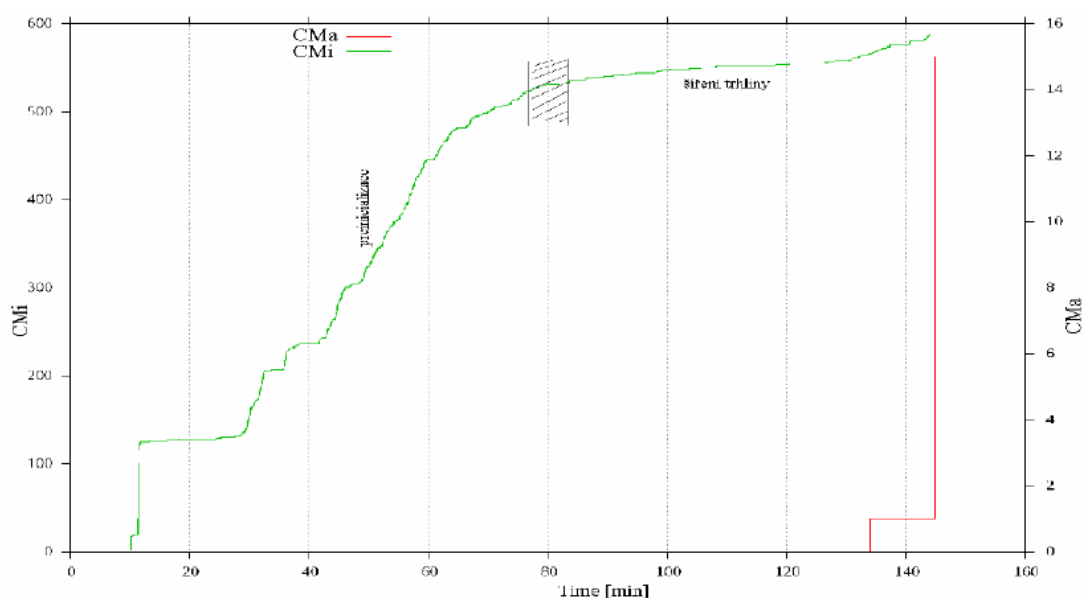
Obr. 123 Záznam parametrů zkoušky únavového namáhání [66]

Aplikací uvedených koeficientů lze ze zaznamenaných a nezpracovaných dat **c1**, **c2**, **evn** (obr. 123) vyhodnotit preiniciační fáze vzniku únavové trhliny, interval iniciace a jednotlivé fáze šíření trhliny. Na uvedeném obrázku je hnědou křivkou zobrazen nárůst trhliny, zjištěný metodou měření elektrických potenciálů. Z porovnání obr. 123 a 125 je zřejmá silná korelace stanovení bodu iniciace trhliny, zjištěná měřením elektrických potenciálů a pomocí parametrů **C_{Mi}**, resp. **C_{Ma}**.

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise



Obr. 124 Průběh velikosti parametrů CRP, CFP během zkoušky, [66]



Obr. 125 Zobrazení různých fází poškození vzorku během zkoušky a jejich korelace s parametry CMa, CMi, [66]

Aktuální verze programového vybavení pro analyzátor AUP umožňuje zobrazení průběhu parametrů v reálném čase. Uvedený postup umožňuje detekci iniciace šíření únavové trhliny s využitím jediného snímače AE, a to bez znalosti polohy této trhliny.

Při použití metody elektrických potenciálů je třeba předem předpokládat polohu trhliny a vnitřní snímací elektrody umístit na její protilehlé strany [66, 67].

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

Tab. 19 Přehled zkoušených vzorků [63]

tloušťka [mm]	délka [mm]	otvor [mm]	číslo vzorku [-]	plocha [mm ²]	síla [kN]	napětí [MPa]	počet cyklů [], frekvence 10Hz
2,00	60	11,00	23	109,00	45	412,8	52700 LOM (použit nový přípravek)
2,00	60	11,00	24	109,00	45	412,8	21677 STOP (vada desky), 83485 zvednutí síly LOM
2,00	60	11,00	25	109,00	45	412,8	52952 LOM
2,00	60	11,00	26	109,00	52	477,1	48960
1,80	60	9,90	27	98,10	45	458,7	47956 LOM
1,88	60	10,34	28	102,46	45	439,2	31393 LOM (24193 cyklů - pozorována trhлина)
1,80	60	9,90	29	98,10	45	458,7	29440 LOM (24500 cyklů - pozorována trhлина)
		0,00	30	0,00	45		75432 STOP
1,97	60	10,84	31	107,37	59,7	556,0	27089 LOM
BAGO	BAGO	BAGO	32	BAGO	BAGO	BAGO	BAGO_Zkouška šumu
2,00	60	11,00	33	109,00	51,5	472,5	61228
2,00	60	11,00	34	109,00	51,5	472,5	27843 LOM
2,00	60	11,00	35	109,00	51,5	472,5	34200 STOP (odhaduji z XEDA +- 5000cyklů)
1,98	60	10,89	36	107,91	27,5	254,8	776562 LOM
1,97	59	10,81	37	105,13	26	247,3	371114 LOM
1,60	60	8,80	38	87,20	26	298,2	4715627 LOM V UCHYCENI
1,87	60	10,27	39	101,81	30	294,7	354600 LOM
1,96	58,2	10,76	40	103,13	31,2	302,5	166 200
2,03	58,2	11,18	41	107,14	34	317,3	1 080 000
2,00	58,2	11,00	42	105,40	41	389,0	98914STOP_Trhлина, cca 4mm na každé straně, spuštěno 25kN, 218851 LOM
1,92	58,2	10,56	43	101,18	50	494,1	29760 cyklů síla na 40kN, 36600 cyklů síla na 30kN, 42860 LOM
2,00	57,8	11,02	44	104,81	45	429,4	61 200 cyklů trhлина, síla snížena na 25kN (možná 20kN), 146117 LOM

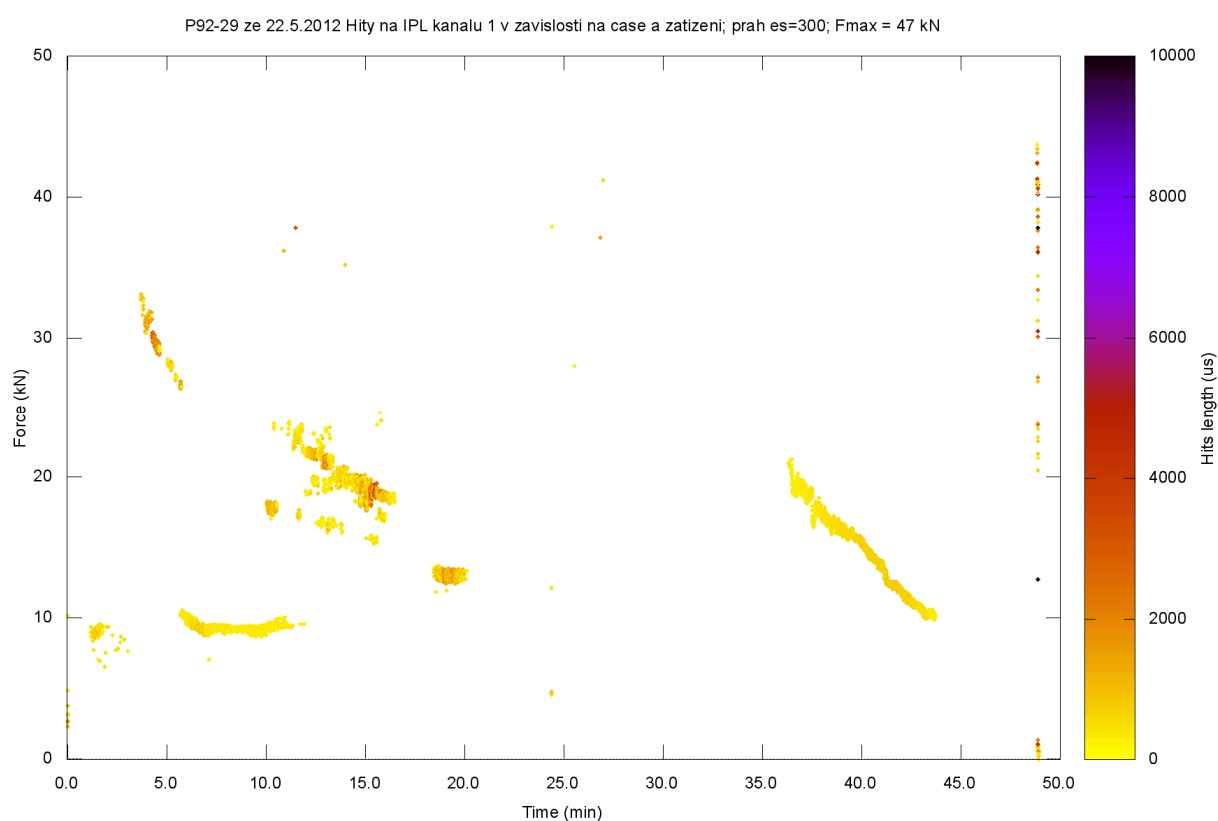
Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

Tab. 20 Přehled zkoušených vzorků [63]

Označení vzorku	Síla [kN]	Napětí [MPa]	Frekvence [Hz]	Počet cyklů [-]
P92-1	15 - 150	670	13 Hz	104 836 LOM
P92-2	11,5 - 115	510	13 Hz	83 452 LOM
P92-3-15CH2NMFA	15 - 150		různá	24 903 LOM
			13 Hz	do 19 400
			5 Hz	od 19 400 do 24 903 LOM
P92-4-15CH2NMFA	15 - 150		různá	14 251 LOM
			13 Hz	do 9 000
			5 Hz	od 9 000 do 14 251 LOM
P92-6	12,5 - 125	372	různá	118 600
			13 Hz	do 10 000
			5 Hz	od 10 000 do 20 000
			13 Hz	od 20 000 do 90 590
			5 Hz	od 90 590 do 118 600 LOM
P92-7	12,5 - 125	382	různá	146 530
			13 Hz	do 96 000
			5 Hz	od 96 000 do LOMU
P92-8	15 - 115	330,5	5 Hz	172889 LOM
P92-9	12,5 - 125	365	5 Hz	do 79 000 viditelná trhлина
			0,5 Hz	od 79 000 do 96 000 trhлина (nedokmitáno do lomu)
P92-10	0 - 100	350	různá	312 415
			3 Hz	od 30 000 do 30 850
			1 Hz	od 30 850 do 30 950
			0,5 Hz	od 30 950 do 31 000
			0,03 Hz	od 31 000 do 33 215
P92-15=P92-10	0 - 100	294	5 Hz	od 33 215 do 312 415 LOM
P92-13	0 - 90	262,5	5 Hz	9 999 900
P92-14	0 - 105	305,8	5 Hz	215000 LOM
P92-16	0 - 100	288	5 Hz	778874 trhлина (nedokmitáno do lomu)
			0,1 Hz	od 784734 do 812 903
			0,1 Hz	od 812 903 do 812964
P92-17	0 - 115	293		255261STOP/LOM
P92-18	0-100	300,43		200 043 LOM
P92-19		341,7		81 988 STOP
P92-20		337,8	1Hz	90302 STOP

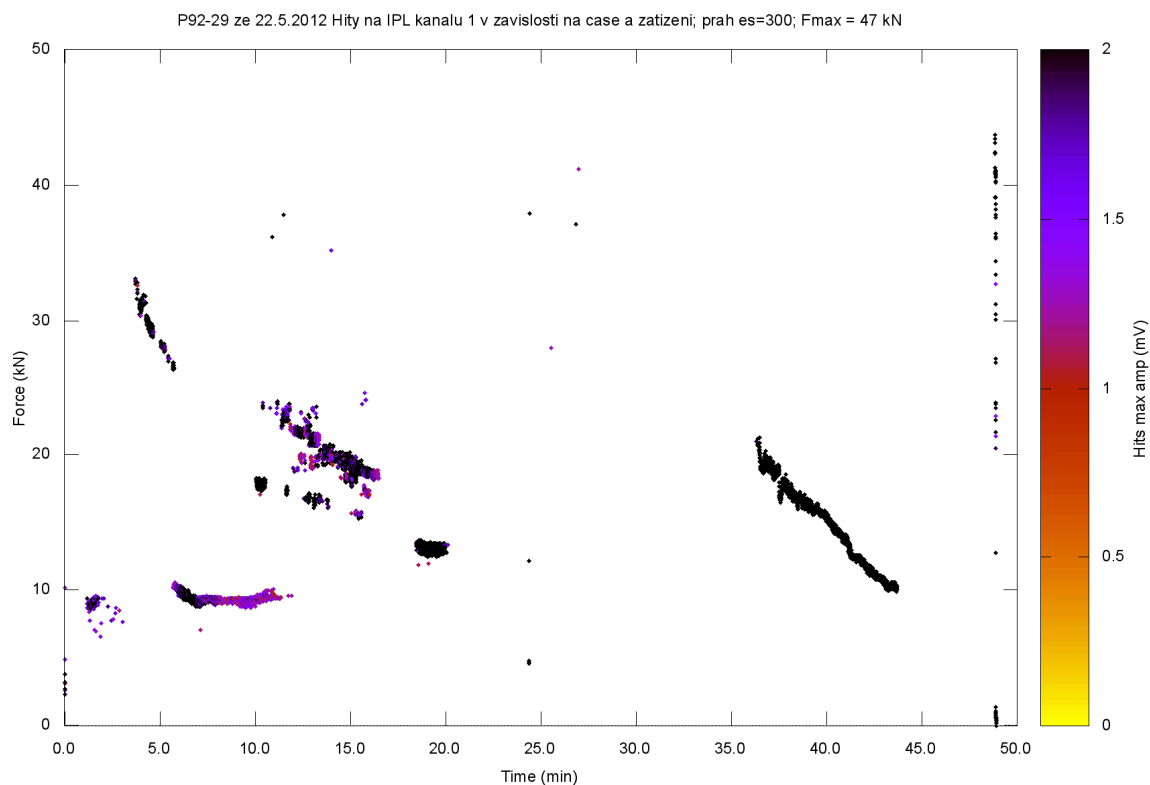
Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

Na základě získaných dat a současného snímání síly, lze výsledky zkoušek zaznamenat do tzv. „Hvězdných map“, kde je možné vidět aktivitu AE v závislosti na síle. Do grafů je tedy možné vynést vlevo na y-ové ose sílu, vpravo na y-ové ose délku události (Hits length), maximální amplitudu signálu v době trvání události (Hits max amp), časem, kdy je tohoto maxima dosaženo (Hits risetime), popř. počtem překmitů přes prahové úrovně Count1 a Count2, opět v rámci dané události. Všechny popsané parametry jsou snímány systémem XEDO a IPL a zpracovány programem Daeshow Dakel UI. Právě tyto grafy vedly k vytvoření nového souboru knihoven LibAE, viz. výše, neboť bylo zjištěno, že k největším aktivitám akustické emise nedochází paradoxně při nejvyšší síle, ale naopak při nárůstu, popř. poklesu, což je velice důležitý poznatek, neboť při tlakových zkouškách je systém AE dle požadavků normy vypnut při dosažení maximální síly.

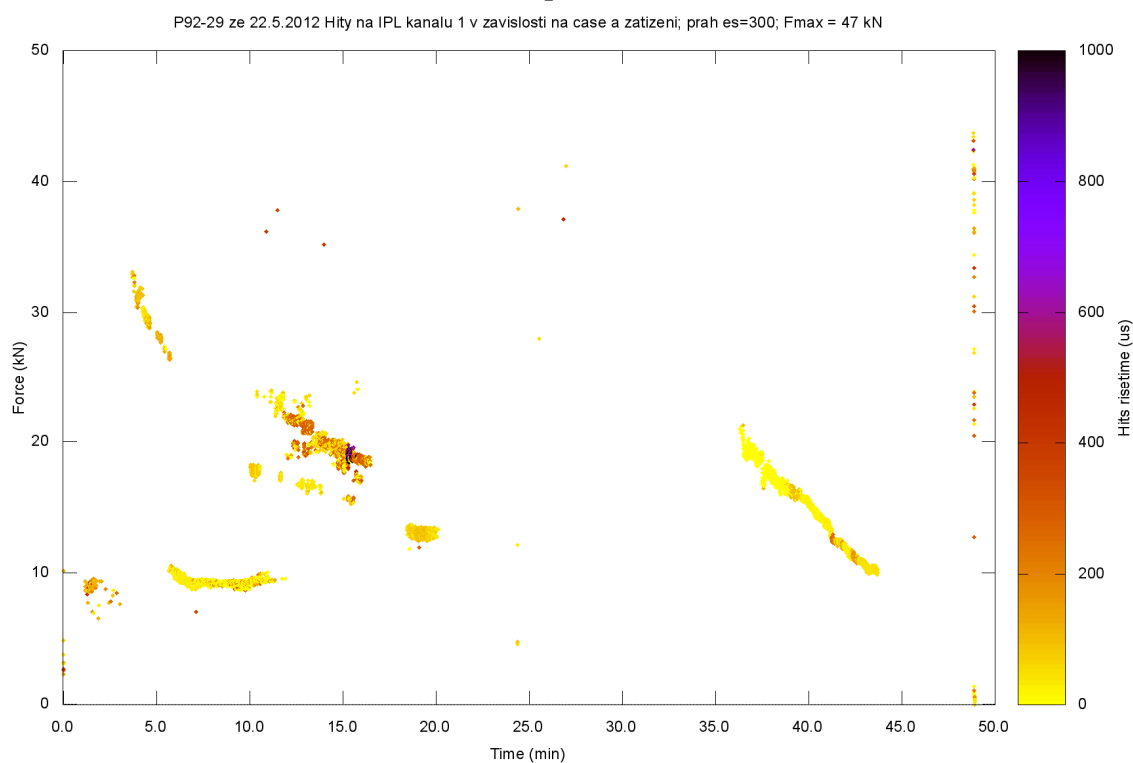


Obr. 126 P92-29 ze 22.5.2012 Hity na IPL kanálu v závislosti na čase a zatížení, Hits length (us) [68]

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

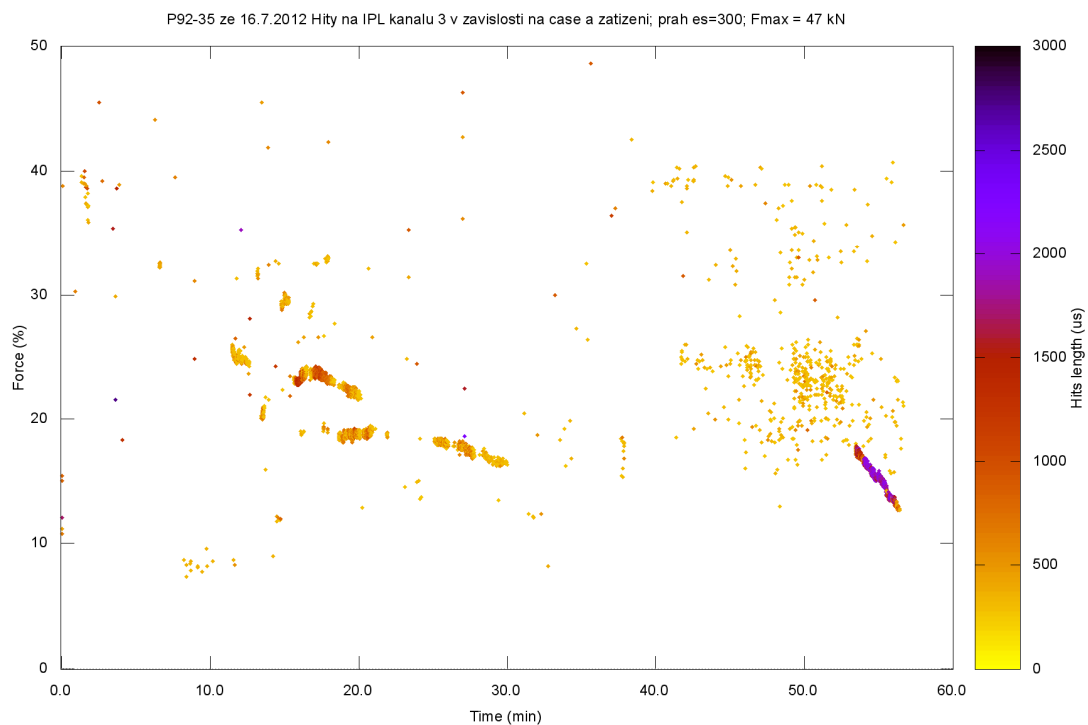


Obr. 127 P92-29 ze 22.5.2012 Hity na IPL kanálu 1 v závislosti na čase a zatížení, Hits max amp (mV) [68]

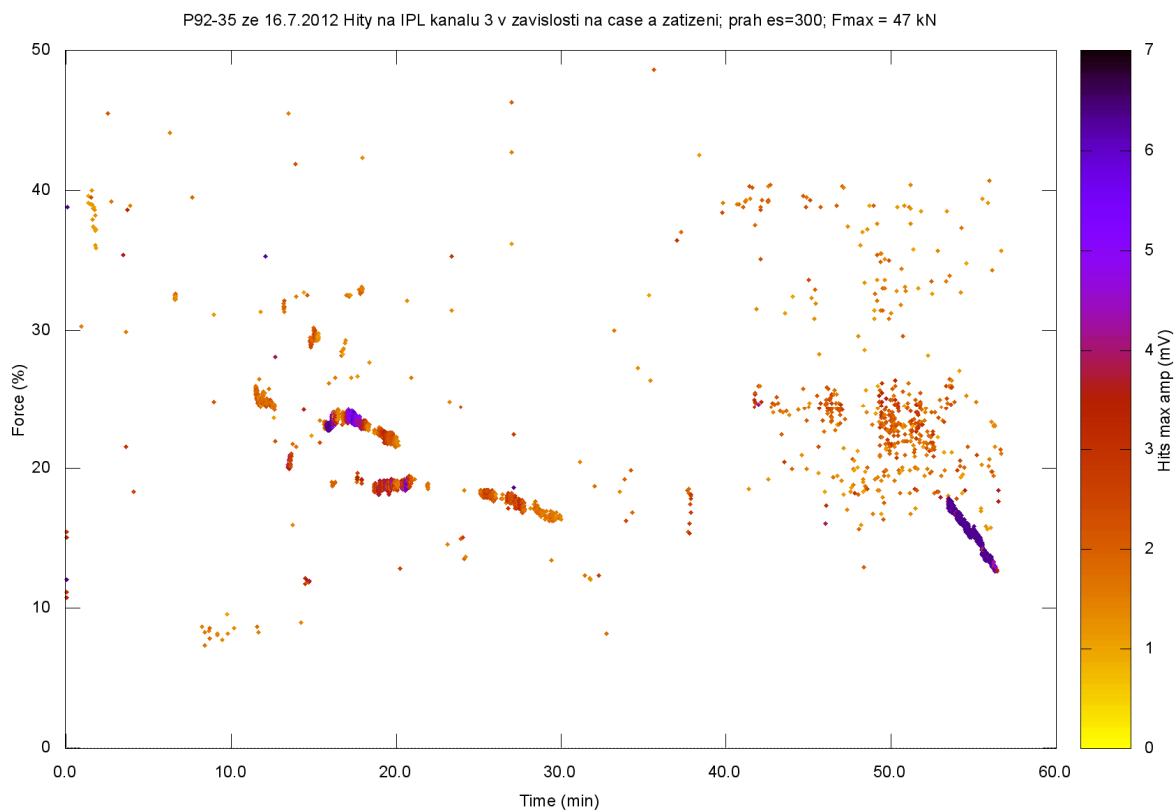


Obr. 128 P92-29 ze 22.5.2012 Hity na IPL kanálu 1 v závislosti na čase a zatížení, Hits risetime (us) [68]

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

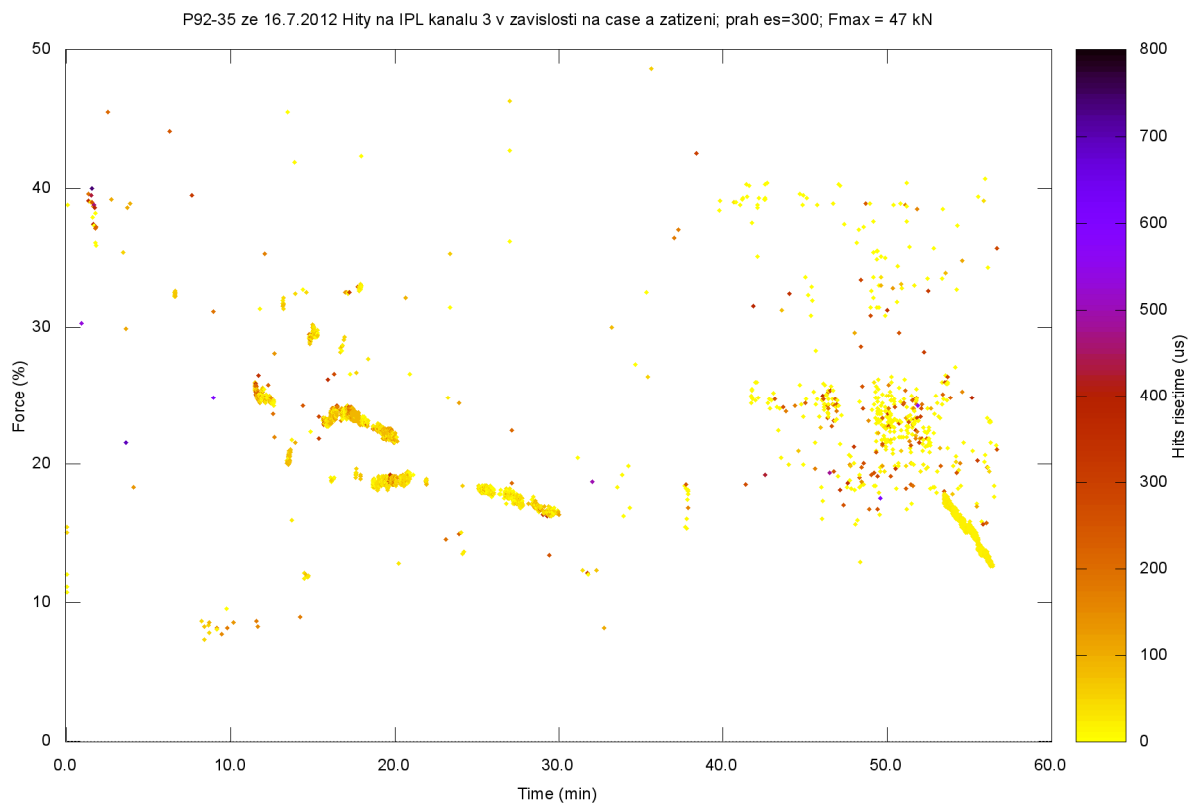


Obr. 129 P92-35 ze 16.7.2012 Hity na IPL kanálu 3 v závislosti na čase a zatížení, Hits length (us) [68]



Obr. 130 P92-35 ze 16.7.2012 Hity na IPL kanálu 3 v závislosti na čase a zatížení, Hits max amp (mV) [68]

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

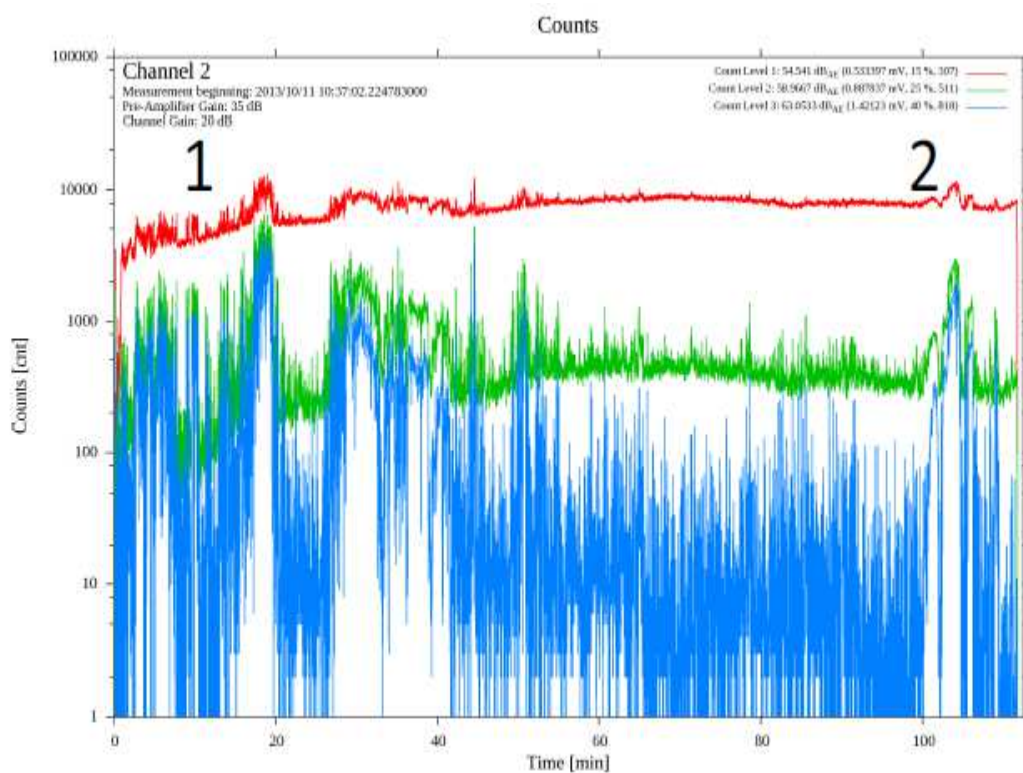


Obr. 131 P92-35 ze 16.7.2012 Hity na IPL kanálu 3 v závislosti na čase a zatížení, Hits risetime (us) [68]

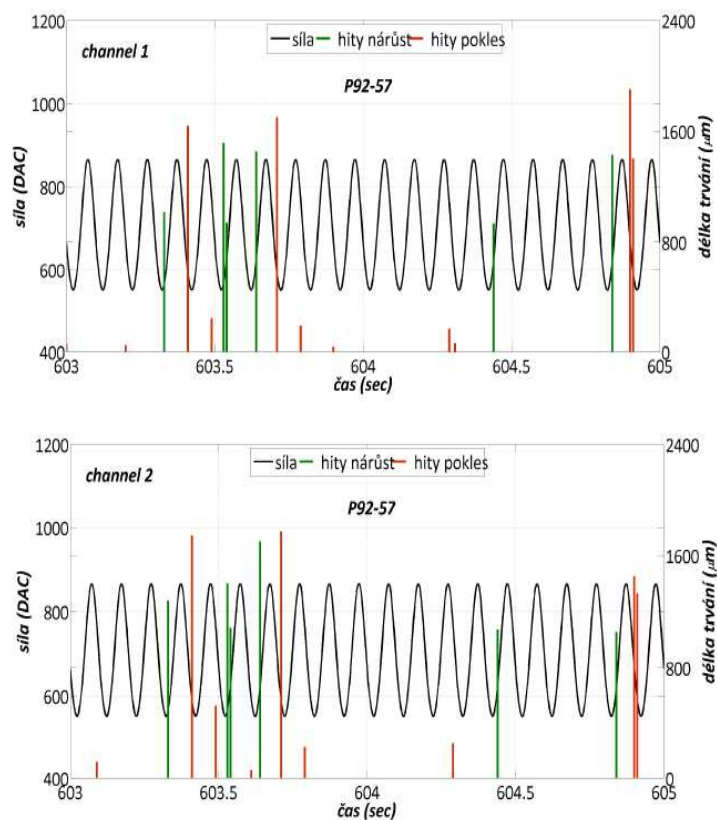
Na **obr. 126-131** jsou pozorovatelné oblasti se zvýšeným výskytem hitů (podle velikosti sledovaných parametrů **AE** - délka doby náběhu-risetime, amplituda, délka trvání hitu.

Oblast 1 (10.-30. minuta) vyjadřuje změnu mechanických vlastností materiálu, oblast 2 (50.-57. minuta) pak iniciaci trhliny a vlastní šíření trhliny do konečného lomu.

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

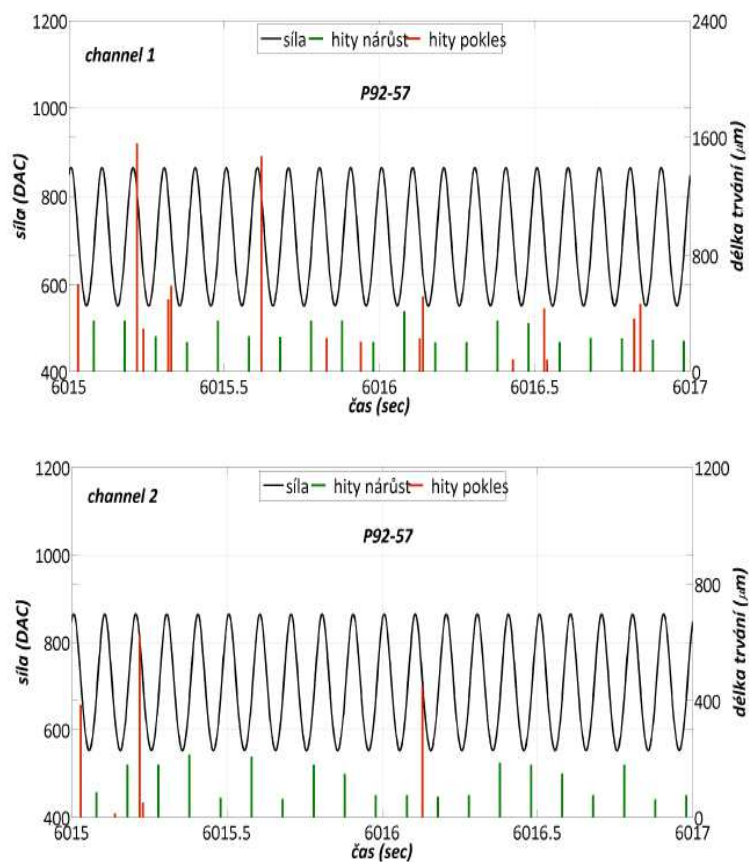


Obr. 132 County a 2 studované oblasti



Obr. 133 Oblast 1: Délka trvání hitů v závislosti na amplitudě síly

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise



Obr. 134 Oblast 2: Délka trvání hitů v závislosti na amplitudě síly

Na **obr. 133, 134** jsou demonstrovány krátké časové intervaly z únavové zkoušky, červeně a zeleně jsou zobrazeny délky hitů při poklesu a nárůstu síly. Na základě opakovaných měření bylo zjištěno, že většina hitů **AE** byla detekována při poklesu síly.

8. Diskuze výsledků

8.1. Metoda Small Punch test - TAH

V rámci metody **SP** bylo celkem odzkoušeno třináct různých druhů materiálů. Jednalo se o oceli používané v energetickém průmyslu zejména pro výrobu rotorů, potrubí, parovodů a jejich kolen, mezikusy, hrdla, atd.).

V první etapě byl řešen postup výroby vzorků, jako klíčové části celé metodiky. Výroba prvních vzorků trvala cca dvě hodiny, což bylo pro větší rozsah experimentů nepřijatelné. Díky propracovanějšímu postupu a pořízení přesnější pily pro dělení vzorků se tato doba zkrátila u jednoho penetračního tělíska na cca pět minut, což je oproti dvěma hodinám značná úspora času. Řešeno bylo i ovlivnění meze kluzu v závislosti na způsobu výroby. Vzorky nelze přímo nařezat na požadovaný rozměr, neboť kvalita povrchu bez následného broušení ovlivňuje výsledky testů. Navržená metodika přípravy vzorků vedla reprodukovatelným výsledkům bez negativního ovlivnění materiálových charakteristik.

Na základě výsledků zkoušek širokého spektra ocelových vzorků bylo dosaženo výsledků na základě kterých bylo možné stanovit jednotný korelační koeficient, který je aplikovatelný u všech ocelí sledovaných. V případě slitin hliníku nebylo možné aplikovat korelační parametry stanovené pro ocel a bylo nutné stanovit parametry pro tuto skupinu materiálů zvlášť, z čehož vyplývá že každý případný další materiál musí být nejprve vyzkoušen a následně mohou být odvozeny korelační parametry. Na základě dosažených výsledků lze konstatovat, že neexistuje universálně platná sada parametrů pro různé typy materiálů.

Dalším krokem vývoje metodiky bylo řešení vlivu jednotlivých imperfkcí zkušebního přípravku, tření, nerovnoběžnosti disku na výsledky testů pomocí numerických simulací na základě získaných dat z testů ocele P92. Sledované imperfekce zatěžovacího přípravku způsobují posunutí zatěžovacího diagramu **SP** testu směrem k nižším hodnotám síly. Největší vliv a to snížení zatěžovací křivky v počátečním stádiu **SP** testu má odchylka od rovnoběžnosti lisovnice. Obdobné výsledky lze očekávat v případě zkušebních vzorků, pokud jejich plochy vykazují nerovnoběžnost v řádu setin mm. Srovnání výsledků experimentů a simulace **SP** testu ukazuje na vliv možných geometrických odchylek přípravku od výkresové dokumentace a vliv náhodných odchylek utahovací síly a geometrie zkušebních vzorků. Účinným prostředkem identifikace systematických a náhodných chyb výsledků se jeví

simulace **SP** testu pomocí **MKP**, kterou lze rovněž použít ke studiu kauzálních vztahů výsledků **SP** testu a vlastností materiálu.

Na základě vývoje zkušební metodiky a dosažených výsledků byla ve VZÚ Plzeň vyvinuta a následně úspěšně akreditována metodika - **Stanovení meze pevnosti Small Punch testem** Českým institutem pro akreditaci, která je aktuálně součástí nabízených služeb.

8.2. Metoda Small Punch test – CREEP

V rámci této práce byly zprovozněny tři zkušební standy pro provádění **SP** testů při creepových teplotách. Testován byl materiál P91, SA 213-T22- český ekvivalent 15 313.

Tradiční jednoosé creepové testy pro ocel P91 nebyly provedeny, proto byly použity dříve získané výsledky uvedené v literatuře. Bylo tak učiněno především z důvodů časové náročnosti, protože jeden klasický creepový test může trvat i několik let. Korelační koeficient byl stanoven na základě výsledků **SP** creep testu a napětím při klasické jednoosé creepové. Námi získaný koeficient byl porovnán s koeficienty z dostupné literatury a bylo dosaženo velmi dobré shody s těmito hodnotami. Měření deformace na vzorcích vykazalo standardní trend s jasně rozlišitelnými stádii creepu: primárním, sekundárním a terciálním.

Pro materiál SA 213-T22 byly provedeny jak klasické creepové testy, tak **SP** creep testy v rámci řešení komerční zakázky. I u tohoto materiálu byl stanoven jednotný korelační koeficient na standardních creepových vzorcích vs creep **SP**. Bohužel tyto hodnoty se neshodují s hodnotami pro materiál P91. Zkoušený materiál byl v tomto případě již několik let v provozu, čímž je možné vysvětlit si nejednotnost těchto vztahů, popř. lze konstatovat, že jednotný korelační koeficient nelze u **SP** creep testů stanovit a je tedy nutné provést **SP** creep testy u všech takto provozovaných materiálů, což je vzhledem k časové náročnosti téměř nemožné. Vzhledem k dlouholetým zkušenostem v oblasti creepu se domnívám, že metoda zkoušek **SP** při creepových teplotách není příliš vhodná a upřednostňuji klasické creepové zkoušky.

8.3. Metoda Small Punch test - SMALL FATIGUE TEST

Zkoušky únavy na malých vzorcích byly provedeny u materiálů P92, 15CH2NMFA, a RP350.

Ke zkouškám únavy byly vyrobeny speciální mechanické čelisti, které jsou uvedeny v RIV, jako užitečný vzor. Před započítáním zkoušek byla provedena počítačová simulace metodou konečných prvků pro určení koncentrátoru napětí v kritickém průřezu. Tento koncentrátor je 1,33. Je tedy potřeba při zkouškách únavy s tímto koeficientem počítat při vyhodnocování. Byly provedeny únavové testy materiálu RP350 a 15CH2NMFA, které po uvažování koncentrace napětí dávají dobrou shodu s klasickými únavovými zkouškami. V případě materiálu P92 byl mimo jiné řešen vliv výroby na výsledky zkoušek a lze konstatovat, že ať je vzorek vyřezán vodním paprskem-velice levná metoda, či zda je vyroben klasickými způsoby obrábění, výsledky jsou téměř identické. Vzhledem k ceně a délce výroby vzorků vodním paprskem upřednostňuji pro výrobu *SFT* vzorků právě tuto metodu. Stanovené meze únavy vykazují stejné poměry mezi standardními a miniaturními vzorky v rámci jednoho součinitele asymetrie. Pro součinitel asymetrie $R=0,1$ je poměr meze únavy standardní zkoušky k mezi únavy *SFT* zkoušky 1,31. Pro součinitel asymetrie $R=-1$ je poměr meze únavy standardní zkoušky k mezi únavy *SFT* zkoušky 1,32. Tyto výsledky vykazují velmi dobrou shodu. Na základě dosažených výsledků lze stanovený poměr brát jako materiálový korelační vztah pro ocel P92. Zkoušky *SFT* vykazují velmi dobré výsledky v porovnání se standardními zkouškami s vysokou opakovatelností a tento způsob se jeví jako velmi vhodný pro vyhodnocování únavové životnosti v případech omezeného množství experimentálního materiálu.

8.4. Metoda akustické emise

Metodou *AE* byly monitorovány zkoušky nízkocyklové únavy materiálu P92. Odkoušeno bylo cca 60ks vzorků. Po odladění počátečních problémů s rušením signálu od servo-hydraulického stroje a návrhu nového typu vzorku, bylo pro sledování růstu trhliny využito také měření elektrického potenciálu. Zvolena byla záměrně nízkocyklová únava, neboť počet startů a vypnutí energetických bloků se pohybuje po dobu životnosti v této oblasti. Ze

získaných výsledků vyplývá, že metodou **AE** je možné odhalit počínající změny v materiálu (změny mechanických vlastností) ještě před vznikem trhliny, která je v provozu naprosto nežádoucí. **Akustická emise** je tedy pro praxi daleko užitečnější, než metoda elektrického potenciálu, která je schopná detekovat až rostoucí trhliny.

Vzhledem ke zkušenostem firmy Dakel, se podařilo detekovat a lokalizovat trhlinu s využitím pouze jednoho snímače, což je unikátní řešení. Ve spolupráci s firmou Dakel byl vytvořen nový program pro vyhodnocování jednotlivých událostí **AE** v různých fázích zatěžovacího cyklu (min, max, nárůst, pokles), což bude mít význam zejména pro tlakové zkoušky, u kterých po dosažení maximálního tlaku zatěžovaná komponenty dochází k vypnutí **AE** a zkouška je považována za ukončenou. V případě realizovaných měření byl zjištěn nárůst emisní aktivity při poklesu z maximální síly směrem k nule dochází k vyšší aktivitě emisních událostí.

Byla detekována jednotlivá stádia únavového porušení (změna mechanických vlastností, růst trhliny+lom). Lze tedy při použití **AE** ve vybraných typech provozu s dostatečným předstihem lokalizovat nežádoucí změny v materiálu, které vedou k destrukci celého zařízení a velkým ekonomickým ztrátám

9. Závěr

Tato disertační práce s názvem „Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise“, poskytuje návod pro výrobu a hodnocení mechanických vlastností malých vzorků, které lze připravit z minimálního množství materiálu, díky tzv. semi-destruktivnímu odběru. Pomocí akustické emise je zde řešena včasná detekce počínajícího růstu trhliny při únavovém poškozování. Na základě několikaleté práce v této oblasti lze konstatovat tyto závěry.

Byl stanoven jednotný postup pro výrobu malých vzorků, kdy se příprava vzorku snížila z dvou hodin na pět minut. Na základě dosažených výsledků při provádění **SP** testů byla ve VZÚ Plzeň vyvinuta a následně úspěšně akreditována metodika - **Stanovení meze pevnosti Small Punch testem** Českým institutem pro akreditaci, která je aktuálně součástí nabízených služeb. Pomocí počítačových simulací byly stanoveny možné odchylky výsledků, ke kterým může docházet v případě nedodržení výroby zkušebních tělísek, popř. při zkoušení s nedokonale vyrobenými přípravky. V případě slitin hliníku nebylo možné aplikovat korelační parametry stanovené pro ocel a bylo nutné stanovit parametry pro tuto skupinu materiálů zvlášť, z čehož vyplývá že každý případný další materiál musí být nejprve vyzkoušen a následně mohou být odvozeny, popř. potvrzeny získané korelační parametry.

Byly zprovozněny tři creepové standy pro provádění **SP** testů za zvýšených teplot. Získaný koeficient pro materiál P91 byl porovnán s koeficienty z dostupné literatury a bylo dosaženo velmi dobré shody s těmito hodnotami. Měření deformace na vzorcích vykazalo standardní trend s jasně rozlišitelnými stádii creepu: primárním, sekundárním a terciálním. Pro materiál SA 213-T22 byly provedeny jak klasické creepové testy, tak **SP** creep. I u tohoto materiálu byl stanoven jednotný korelační koeficient na standardních creepových vzorcích vs creep **SP**. Bohužel tyto hodnoty se neshodují s hodnotami pro materiál P91. Zkoušený materiál byl v tomto případě již několik let v provozu, čímž je možné vysvětlit si nejednotnost těchto vztahů, popř. lze konstatovat, že jednotný korelační koeficient nelze u **SP** creep testů stanovit

a je tedy nutné provést **SP** creep testy u všech takto provozovaných materiálů, což je vzhledem k časové náročnosti téměř nemožné. Vzhledem k dlouholetým zkušenostem v oblasti creepu se domnívám, že metoda zkoušek **SP** při creepových teplotách není příliš vhodná a upřednostňuji klasické creepové zkoušky.

Ke zkouškám únavy byly vyrobeny speciální mechanické čelisti, které jsou uvedeny v RIV, jako užitiný vzor. Před započítím zkoušek byla provedena počítačová simulace metodou konečných prvků pro určení koncentrátoru napětí v kritickém průřezu. Byly stanoveny korelační koeficienty pro jednotlivé typy materiálů, hodnocen byl vliv výroby vzorku pomocí vodního paprsku vs. tradiční způsoby obrábění. Lze konstatovat, že druh výroby vzorku nemá na výsledky meze únavy téměř žádný vliv. Zkoušky **SFT** vykazují velmi dobré výsledky v porovnání se standardními zkouškami s vysokou opakovatelností a tento způsob se jeví jako velmi vhodný pro vyhodnocování únavové živostnosti v případech omezeného množství experimentálního materiálu.

Metodou **AE** byly monitorovány zkoušky nízkocyklové únavy, neboť počet startů a vypnutí energetických bloků se pohybuje po dobu životnosti právě v této oblasti. Ze získaných výsledků vyplývá, že metodou **AE** je možné odhalit počínající změny v materiálu (změny mechanických vlastností) ještě před vznikem trhliny, která je v provozu naprosto nežádoucí. Byla detekována jednotlivá stádia únavového porušení (změna mechanických vlastností, růst trhliny + lom). Podařilo se detekovat a lokalizovat trhlinu s využitím pouze jednoho snímače, což je unikátní řešení.

Pomocí **AE** tedy lze ve vybraných typech provozu s dostatečným předstihem lokalizovat nežádoucí změny v materiálu, které vedou k destrukci celého zařízení a velkým ekonomickým ztrátám.

Výsledky této disertační práce jsou použitelné pro hodnocení mechanických vlastností a degradace materiálů a jsou velkým přínosem zejména pro oblast energetického průmyslu. Díky zrychlené výrobě vzorků se databáze korelačních vztahů pro vyhodnocování mechanických vlastností rychle rozrůstá.

10. Seznam použité literatury

- [1] ČSN EN ISO 6892-1: Kovové materiály – zkoušením tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty, únor 2010
- [2] ČSN EN 10002-1: Kovové materiály. Zkouška tahem. Část 1: Zkouška tahem za okolní teploty, prosinec 1994
- [3] HLUCHÝ, M. a kol.: Strojírenská technologie I, SNTL 1971
- [4] MENTL, V.: Nedestruktivní zkoušky tečení a relaxace, texty k přednáškám z DPZ, ZČU Plzeň, 2003
- [5] SKÁLOVÁ, J., KOVAŘÍK, R., BENEDIKT, V.: Základní zkoušky kovových materiálů, ZČU Plzeň, 2000
- [6] KRŽIŽ, A.: Lomy při tečení, texty ke cvičení z MK, ZČU, 2007
- [7] 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
- [8] NEMÉT, J.: Sledování fázových přeměn konstrukčních ocelí, ZČU-FST-KMM, disertační práce 2009
- [9] <http://www.engr.sjsu.edu/WofMatE/FailureAnaly.htm>
- [10] VÁRKOLY, L., ZUIDEMA, J., VÁRKOLYOVÁ, M., CHALUPOVÁ, M.: Fatigue Failure of materials theory & solved examples Únavové porušovanie materiálův theoria a riešené príklady, Žilina EDIS 1998
- [11] SERENSEN, S.V., KOGAJEV, V.P.: Únosnost a pevnostní výpočty strojních součástí, SNTL Praha, 1967
- [12] KLESNIL, M., LUKÁŠ, P.: Únava kovových materiálů při mechanickém namáhání, Academia, Praha, 1975
- [13] VÁRKOLY L., ZUIDEMA J., VÁRKOLYOVÁ M., CHALUPOVÁ M.: Fatigue Failure of materials theory & solved examples Únavové porušovanie materiálův theoria a riešené príklady, Žilina EDIS 1998
- [14] FRÖHLICH, V.: Únava konstrukcí při víceosém náhodném zatížení; diplomová práce, ZČU Plzeň, 2004
- [15] <http://www.engr.sjsu.edu/WofMatE/FailureAnaly.htm>
- [16] MALINA, J.: Vliv termomechanického zpracování na únavové vlastnosti ocelí, diplomová práce, ZČU Plzeň, 2004

Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise

- [17] NĚMEC, J., DVOŘÁK, J., HÖSCHL, C.: Pružnost a pevnost ve strojírenství; SNTL, Praha, 1989
- [18] VĚCHET, S., KOHOUT, J., BOKŮVKA, O.: Únavové vlastnosti tvárné litiny, Žilinská univerzita, Žilina, 2002
- [19] NĚMEC, J.: Tuhost a pevnost ocelových částí; Academia Praha, Praha, 1963
- [20] PLUHAŘ, J., BENEŠ, V., MACEK, K.: Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálů, ČVUT, Praha, 1983
- [21] PLUHAŘ, J. a kol.: Nauka o materiálech, SNTL, Praha, 1989
- [22] http://ime.fme.vutbr.cz/Materials/Vyuka/Vlach/Ze_zivota/Comet.doc
- [23] Extract from Application of Small Punch Tests in weld characterization, International conference „Advanced metallic materials and their joinings“, Bratislava 2004
- [24] BICEGO, V.: SP Test Method Assessment for the Determination of the Residual Creep Life of Service Exposed Components, EC Contract ERB CIPA CT94 0103, communication to partners, 1997
- [25] BICEGO, V.: Suggested parts to be put in the ECCC WG1.1 report on miniature creep testing, CESI 2003
- [26] PURMENSKÝ, J., KARÁSEK, J., KANDER, L., MATOCHA, K.: Možnosti posuzování degradace vlastností konstrukčních materiálů vlivem dlouhodobého provozu OK, Teplice, Sborník II konference velkstroje a těžební technika, 2000
- [27] FRANCISKO, P.: Únavové vlastnosti materiálu stanovené pomocí malých vzorků, ZČU Plzeň 2003
- [28] PURMENSKÝ, J.: Nová metoda diagnostiky životnosti materiálu energetických zařízení, Lendorf, Sborník referátů semináře „Efektivní energetika“, 2000
- [29] KUBOŇ, Z.: Small sampling test method, Vítkovice-Research and Development, Ltd., 2005
- [30] LUCAS, G. E.: Review of Small Specimen Test Techniques for Irradiation Testing, Metallurgical Transactions, 1990
- [31] BICEGO, V., MATOCHA, K., ABENDROTH, M.: Small Punch Test Method for Metallic Materials, 2005
- [32] MENTL, V., KANTA, V., DŽUGAN, J.: Rozvoj metodik měření mechanických vlastností kovových materiálů pomocí klasických a miniaturních zkušebních těles, VYZ 0824/2005
- [33] MILIČKA, K., DOBEŠ, F.: Použití techniky malých vzorků pro hodnocení mechanických vlastností moderních kovových materiálů, Ústav fyziky materiálů AV ČR, Brno 2002
- [34] PURMENSKÝ, J., MATOCHA, K.: Determination of long-term material properties degradation using small specimen testing, Proc. of 7th Informative and Training Symposium, „Diagnostic and

- Maintenance of Long Time Operated Power Equipment, Ustroň, Hotel Belweder, October 5-7, 2005
- [35] BRUSCATO, R.: Welding Research Supplement, April 1970
- [36] HA, J. S., FLEURY, E.: Small punch tests to estimate the mechanical properties of steels for steam power plant: II. Fracture toughness, International Journal of Pressure Vessels and Piping 75 (1998)
- [37] KANDERL, L.: Použití metody malých vzorků pro odhad zbytkové životnosti tepelných elektráren, Závěrečná zpráva projektu MŠMT č. 1P05ME813, Ostrava 2006
- [38] BICEGO, V., CERUTTI, P., FOULDS, J., HURST, R., MATOCHA, K., ABENDROTH, M.: Small Punch Test Method for Metallic Materials, Part B: Code of Practice for Small Punch Testing for Tensile and Fracture Behaviour, 2006
- [39] VOLÁK, J. : Upínací čelisti pro vzorky únavy na malých vzorcích, Chladicí komora pro Small Punch, Vypracováno v rámci výzkumného záměru MŠMT ČR: MSM 4771868401, „Výzkum provozní degradace konstrukčních materiálů“, VYZ/TGZ 53/1/2008
- [40] KOPEC, B. a kol.: Nedestruktivní zkoušení materiálů, Brno 2008
- [41] KOULA, V. a kol.: Systém akustické emise DAKEL, 2000-2011
- [42] VOLÁK, J., MENTL, V.: POS-AZL/15-53/012- Stanovení meze pevnosti Small Punch testem, 1.12.2011
- [43] VOLÁK, J.: Diplomová práce, Využití klasických a netradičních zkoušek mechanických vlastností při hodnocení zbytkové životnosti energetických zařízení, 2008, ZČU, FS
- [44] VOLÁK, J.; MENTL, V.: Testing of Small Local Zones by means of Small Punch Test at Room and Creep Temperatures, Chem. Listy 104, s386-s389(2010)LMV 2009, ISSN 0009-2770
- [45] KANTA, V.: Přípravek na zkoušky protlačováním (Small punch test), Výkresová dokumentace, Škoda Výzkum s.r.o., 2005
- [46] www.redhill-balls.cz
- [47] VOLÁK, J.: Nepublikované výsledky měření: Protocol -07.06.2011, VZÚ Plzeň, 2012
- [48] VARNER, M., KOULA, V., VOLÁK, J.: Influence of instrumentation imperfections on SPT results, Olomouc 2013, str. 221-228, 5. – 7. 11. 2013, ISBN 978-80-214-4799-8
- [49] MANNESMANNRÖHRENWERKE AG, DÜSSELDORF, Žárupevná ocel na trubky X 10 CrMoVNb 9 1 W.Nr. 1.4903, materiálový list č. 435, žárupevnost v tomto materiálovém listu je převzata z DIN 17175 dodatek A, 1991
- [50] 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, výzkumná zpráva VYZ 1125/2008

- [51] BUNDA, Z., VOLÁK, J., CHVOSTOVÁ, E.: Comparison of results correlations of the steels P91, P92 and 15 313 after creep SP test. CD-ROM Conference METAL 2013 Proceedings, Tanger, Brno, 13. - 17. 5. 2013, ISBN 978-80-87294-39-0
- [52] BUNDA, Z., VOLÁK, J., CHVOSTOVÁ, E.: Assessment of remaining lifetime of the boiler tube and microstructure analysis. Flash disc – Baltica 2013, VTT, Helsinki-Finsko, p. 477-483, 11.- 13. 6. 2013, ISBN 978-951-38-8025-5
- [53] NOVÁK, M., VOLÁK, J., CHOCHOLOUŠEK, M., MENTL, V.: Hodnocení mechanických vlastností konstrukčních materiálů prostřednictvím miniaturních zkušebních těles výzkumná zpráva VYZ 1374/11
- [54] VOLÁK, J., CHOCHOLOUŠEK, M.: Stanovení únavových charakteristik oceli P92, výzkumná zpráva VYZ 1373/11
- [55] VOLÁK, J.: Stanovení únavových charakteristik oceli 15CH2NMFA, výzkumná zpráva VYZ-VZ-53/13/1524
- [56] VOLÁK, J., MENTL, V.: A Comparison of Fatigue Characteristics of Structural Steels Measured by means of Classic and Miniature Test Samples. CD-ROM Proceedings of The Ninth International Conference on Multiaxial Fatigue & Fracture ICMFF9, University of Parma, Parma (Italy), June 2010. ISBN 978-88-95940-31-1
- [57] POLACH, P., VOLÁK, J., KINDELMANN, P., HAJŽMAN, M.: Degradation of Material Mechanical Properties and Its Evaluation Using Miniature Test Specimens, Proceedings of 49th International Scientific Conference Experimental Stress Analysis 2011, Znojmo, pp. 333-340, June 2011, ISBN 978-80-241-4275-7
- [58] VOLÁK, J., MENTL, V.: Vliv velikosti, obrobění a tvaru vzorku na výsledky zkoušek únavy malých vzorků-Výzkumná zpráva ŠKODA VÝZKUM s.r.o., výzkumná zpráva VYZ 1313/2010
- [59] VOLÁK J.; MENTL V.: Vliv tvaru vzorku typu „Small Punch“ na výsledky zkoušek únavy. Výzkumná zpráva ŠKODA VÝZKUM s.r.o., výzkumná zpráva VYZ 1212/2009
- [60] VOLÁK, J., BUNDA, Z., MENTL, V.: Comparison of P92 steel fatigue test results in relation to specimen size and manufacturing. CD-ROM ASME 2013 Pressure Vessels and Piping Conference (PVP 2013), ASME, Paris - France, July 14 – 18, 2013
- [61] VOLÁK, J., CHOCHOLOUŠEK, M., NOVÁK, M.: Determination of Fatigue Characteristics of Steel P92, METAL 2012, Brno 23.-25. 5. 2012, pp 827-830, ISBN 978-80-87294-31-4
- [62] MENTL, V.; VOLÁK, J.; CHOCHOLOUŠEK, M.; KINDELMANN, P.: Korelace únavových charakteristik ocelí pro energetiku měřených na klasických a miniaturních zkušebních tělesech. Sborník 4. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách, Srní, pp. 254-257, říjen 2009
- [63] VOLÁK, J.: Program TIP - MPO, projekt FR - TI2/447, „Provozní analyzátor únavového poškození strojních dílů, využívající akustickou emisi“ Výzkumná zpráva 2/4/2013 Zkoušky nízkocyklové únavy oceli P92

- [64] KOULA, V. a kol.: Program TIP-MPO, projekt FR-TI2/447', Provozní analyzátor únavového poškození strojních dílů využívající akustickou emisi; Výzkumná zpráva 01/2011; Měření AE na cyklicky namáhných vzorcích, Praha, srpen 2011
- [65] KOULA, V. a kol.: Program TIP-MPO, projekt FR-TI2/447; Provozní analyzátor únavového poškození strojních dílů využívající akustickou emisi; Výzkumná zpráva 02/2011, 03/2011; Výzkum korelačních vztahů mezi AE a klasickou diagnostikou; Návrh a konstrukce analyzátoru únavového poškození, Praha, prosinec 2011
- [66] KOULA, V. a kol.: Program TIP - MPO Závěrečná zpráva o řešení projektu; FR - TI2/447, Provozní analyzátor únavového poškození strojních dílů využívající akustickou emisi, květen 2013
- [67] DRÁB, M.: Program TIP-MPO, projekt FR-TI2/447: Provozní analyzátor poškození strojních dílů využívající akustickou emisi, Výzkumná zpráva 1/5/2013, Doplnění knihoven software LibAE a jeho testy na datech z měření oceli P92
- [68] KOULA, V., DRÁB, M., VOLÁK, J.: Defektoskopie 2012, Některé aspekty detekce únavových trhlin metodou akustické emise, Defektoskopie 2012, 30.10.-1.11.2012, Seč, CZ, ppt
- [69] VOLÁK, J.: Provedení miniaturizovaných zkoušek tečení, Bakalářská práce, ZČU Plzeň, 2006

11. Přílohy

Příloha 1 – Seznam použitých obrázků

Obr. 1	Tvary zkušebních tyčí pro zkoušku tahem [3]	13
Obr. 2	Pracovní diagram zkoušky tahem a tlakem u měkké uhlíkové oceli [3].....	15
Obr. 3	Pracovní diagram oceli s výraznou mezí kluzu a oceli bez výrazné meze kluzu [3]	16
Obr. 4	Grafické stanovení $\sigma_{0.2}$ pracovního diagramu [3].....	17
Obr. 5	Příklady pracovních diagramů různých kovů a slitin [3]	18
Obr. 6	Křivka tečení [5]	20
Obr. 7	Křivky tečení [4]	21
Obr. 8	Závislost působícího zatížení a doby do lomu součásti při různých teplotách [4].....	23
Obr. 9	Schematické znázornění vzniku zárodku trhliny r-typu pokluzem po hranicích zrn [6]	25
Obr. 10	Model vzniku trhlin w –typu [6]	26
Obr. 11	Různé obměny jednoduchého mechanismu vzniku trhlin w – typu [6].....	27
Obr. 12	Extrapolace výsledků při zkouškách tečení pomocí Larson-Millerova parametru dle ČSN 15 313.....	29
Obr. 13	Charakteristiky souměrného střídavého namáhání [9].....	31
Obr. 14	Přehled základních druhů cyklického namáhání.....	33
Obr. 15	Schématiké znázornění procesu zpevnění a změkčení [15]	34
Obr. 16	Průběh cyklického zpevnění a změkčení v souřadnicích:.....	34
Obr. 17	Představa kartového skluzu v perzistentním skluzovém pásmu [15].....	37
Obr. 18	Neumanův model tvorby mikrotrhliny [15].....	38
Obr. 19	Schéma postupu šíření únavových trhlin 1 - první etapa šíření, 2 - druhá etapa šíření, 3 - neefektivní trhliny; 4 - plastická zóna na čele trhlin [20].....	40
Obr. 20	Schématiký průběh křivky životnosti [18]	41
Obr. 21	Způsob znázornění vztahu mezi napětím σ_a nebo S_a a počtu cyklů do porušení N_f [12].....	42
Obr. 22	Malý vzorek – penetrační test [29]	46
Obr. 23	Malý vzorek – zkouška únavy [29].....	46
Obr. 24	Místo odběru vzorku zařízením SSam -2 [29]	46
Obr. 25	Místo odběru [29]	47
Obr. 26	Vzorky pro SP test odebrané ze zkušebního materiálu [29]	49
Obr. 27	Schéma odběru materiálu zařízením SSam-2 [31].....	49
Obr. 28	Zařízení pro odběr na vnějším povrchu, magnetické (vlevo), mechanické (vpravo) [29]	50
Obr. 29	Zařízení pro odběr materiálu od firmy Rolls Royce - Ssam 2 [29], detail „odběrové hlavy“ ..	50

Obr. 30 Ukázka odběru materiálu ve ŠKODA POWER A DOOSAN company, firmou MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o.	51
Obr. 31 Definice geometrických parametrů [25, 31]	52
Obr. 32 Tranzitní chování Charpy vs. SP [34].....	55
Obr. 34 Metalografický výbrus [34]	57
Obr. 33 Postup při stanovení efektivní lomové deformace ϵ_f [38]	57
Obr. 35 Závislost mezi $\ln(\ln(h_o/h_f))$ a $\ln(d^*/h_o)$ pro nízkolegovanou [23].....	57
Obr. 36 Návrh zkušebního tělesa pro zkoušky únavy z odebraného materiálu [27].....	58
Obr. 37 Čelisti pro zkoušení únavových testů [39].....	59
Obr. 38 MKP model únavového vzorku [62].....	59
Obr. 39 Zkušební stroj.....	59
Obr. 40 Časový průběh emisního signálu [41].....	64
Obr. 41 Polotovar, [69]	71
Obr. 42 Řezací pila MICRON 3000 [69]	72
Obr. 43 Nařezané vzorky	72
Obr. 44 Přípravek pro broušení vzorků [69]	73
Obr. 45 Brusný stroj [69]	73
Obr. 47 Měření vzorek v mikrometru s ideální tloušťkou [69].....	73
Obr. 46 Konečná podoba vzorků před SP testem.....	73
Obr. 48 a) SP test přípravek rozložený [69] b) SP test přípravek složený [69]..	74
Obr. 49 a) celkové uspořádání zkoušky [69] b) detail zkoušky [69]	75
Obr. 50 Vzorek a kulička, vzorky po provedení SP testu [69].....	75
Obr. 51 Záznam zkoušek SP pro ocel – X14CrMoVNB10-2 [69]	76
Obr. 52 Záznam zkoušek SP test pro ocel – P91 [69].....	77
Obr. 53 Záznam zkoušek SP test pro ocel - 22CrMoNiWV8-8 [69]	78
Obr. 54 Záznam zkoušek SP test pro ocel - 16537 [69].....	79
Obr. 55 Záznam zkoušek SP test pro ocel - X12Cr13 [69].....	80
Obr. 56 Záznam zkoušek SP test pro ocel - Ocel 6 [69]	81
Obr. 57 Záznam zkoušek SP test pro ocel - Ocel 7 [69]	82
Obr. 58 Záznam zkoušek SP test pro ocel - Ocel 8 [69]	83
Obr. 59 Záznam zkoušek SP test pro ocele 6, 7, 8 [69]	84
Obr. 60 Porovnání mezí pevností SP testů a zkoušek tahem [69].....	86
Obr. 61 Ověření spolehlivosti odvozených korelačních vztahů [69]	86
Obr. 62 Záznam zkoušek SP test pro Hliník_3 [43].....	88
Obr. 63 Záznam zkoušek SP test pro Hliník_7 [43].....	89

Obr. 64	Záznam zkoušek SP test pro Dural [43].....	90
Obr. 65	Záznam zkoušek SP test pro Ocel [43]	91
Obr. 66	Záznam zkoušek SP test pro Ocel [43]	91
Obr. 67	Porovnání vzorků vyrobených na míru řezem-černě,	94
Obr. 68	Vyhodnocování meze kluzu dle [31]	94
Obr. 69	Porovnávací test MMV, s.r.o. – VZU Plzeň, s.r.o.	95
Obr. 70	Model a zkoumané imperfekce [48]	97
Obr. 71	Tahové diagramy oceli P92 [48].....	98
Obr. 73	Napětí HMM na konci SP testu [48]	99
Obr. 72	Deformace na konci SP testu [48].....	99
Obr. 74	Síla versus posuv [48]	99
Obr. 75	Vliv předpětí [48].....	101
Obr. 76	Vliv imperfekcí přípravku [48].....	101
Obr. 77	Vliv tření [48]	101
Obr. 78	Napětí HMM na konci SPT-f=0,2 [48].....	102
Obr. 79	Creepové zařízení, speciálně upravené pro SP creep testy	103
Obr. 81	Měřicí ústředna [69].....	104
Obr. 80	Ovládací zařízení pece [69].....	104
Obr. 82	SP creep P91 – závislost deformace na čase [43]	105
Obr. 83	SP creep P91 – závislost deformace na čase [43]	105
Obr. 84	Diagram dle Larson – Millera oceli X10CrMoVNb 9 1 (P91)	106
Obr. 85	Výsledky creep testů (fialově), výsledky small punch creep testů (zeleně) a tabulkové hodnoty (červeně) [51]	108
Obr. 86	Vzorek po SPCT	109
Obr. 87	Části přípravku pro SPCT	109
Obr. 88	Creepové standy upravené pro SPCT	109
Obr. 89	Vliv opracování povrchu materiálu na mez únavy reálného tělesa (21).....	111
Obr. 90	Modelové rozložení napětí ve vzorku SPT únavy. Červeně označená jsou místa s největší koncentrací napětí [62]	111
Obr. 91	Klasické těleso (nahore) pro zkoušky únavy, kde koncentrace napětí v nejužším průřezu je 1. Srovnání s SFT vzorkem (vpravo dole).....	112
Obr. 92	Vzorky zhotovené vodním paprskem,.....	113
Obr. 93	Vzorky zhotovené vodním paprskem z polotovaru desky o tloušťce 1,2 mm	114
Obr. 94	Návrh zkušebního tělesa pro SFT dle [27]	114
Obr. 95	Zkušební stroj Amsler 10 HFP 5100.....	115

Obr. 96	Princip upnutí vzorků SFT [39]	115
Obr. 97	SFT vzorek po zkoušce únavy	116
Obr. 98	Wöhlerovy křivky oceli P92, porovnání standardních a SFT vzorků při $R=0,1$ [54]	119
Obr. 99	Wöhlerovy křivky oceli P92, porovnání standardních a SFT vzorků při $R=-1$ [54]	120
Obr. 100	Wöhlerovy křivky oceli P92, porovnání standardních a SFT vzorků při $R=0,1$ [54]	121
Obr. 101	Wöhlerovy křivky oceli P92, porovnání SFT vzorků při $R=0,1$ vyrobených vodním paprskem a vzorků vyrobených standardním frézováním a soustružením [54]	122
Obr. 102	Wöhlerovy křivky oceli P92, obecné porovnání standardních a SFT vzorků při $R=-1$ a $R=0,1$ [54]	123
Obr. 103	Výsledky zkoušek tahem materiálu P92 [47]	124
Obr. 104	Výsledky zkoušek tahem materiálu 15Ch2NMFA	125
Obr. 105	Wöhlerovy křivky oceli 15CH2NMFA, porovnání standardních a SFT vzorků	126
Obr. 106	Výsledky zkoušek tahem materiálu RP350 [53]	126
Obr. 107	Wöhlerovy křivky materiálu RP 350 porovnání standardních a SFT vzorků	127
Obr. 108	Vzorek upnutý do hydraulických čelistí (nevyhovujících) [63]	130
Obr. 109	Zkušební stroj, měřicí aparatura DAKEL, ovládací jednotka stroje [63]	131
Obr. 110	Mechanické čelisti upnuté do hydraulických čelistí stroje MTS, detail upnutí vzorku [63]	132
Obr. 111	Výkres zkušebního tělesa [66]	132
Obr. 112	Uspořádání vzorku pro potenciálovou metodu - vlevo teoreticky, vpravo prakticky, dole používaná aparatura [64]	133
Obr. 113	Umístění snímačů AE a elektrod pro potenciálovou metodu na měřeném vzorku. Vzorek je upnutý do zkušebního stroje MTS 500 kN v Mechanické zkušebně VZÚ Plzeň	134
Obr. 114	Současné zobrazení výsledků potenciálové metody a AE [64]	135
Obr. 115	Současné zobrazení výsledků potenciálové metody a AE [64]	135
Obr. 116	Záznam počtu událostí AE v průběhu cyklického zatěžování oceli P92 [66]	136
Obr. 117	Spektrogramy z únavových zkoušek materiálu P92 po vyhodnocení FFT [66]	137
Obr. 118	Krátký detail z měření únavového poškození. Černě je označen průběh zatěžovací síly. Červená a zelená křivka udávají časovou závislost frekvence countů pro 2 různé prahy [66]	138
Obr. 119	Zkušební vzorek s trhlinou, snímači akustické emise a elektrodami	138
Obr. 120	Výsledek zkoušky tahem - nahoře pohled na přetržený vzorek	139
Obr. 121	Software Daemon pro měření akustické emise (ukázka lokalizace emisních událostí na zkoušených vzorcích)	139
Obr. 122	Definované oblasti fáze na průběhu externí veličiny zachycující cyklické zatěžování zkoumaného vzorku [67]	140
Obr. 123	Záznam parametrů zkoušky únavového namáhání [66]	141

Obr. 124 Průběh velikosti parametrů CRP, CFP během zkoušky, [66]	142
Obr. 125 Zobrazení různých fází poškození vzorku během zkoušky a jejich korelace s parametry CMA, CMi, [66]	142
Obr. 126 P92-29 ze 22.5.2012 Hity na IPL kanálu v závislosti na čase a zatížení, Hits length (us)	145
Obr. 127 P92-29 ze 22.5.2012 Hity na IPL kanálu 1 v závislosti na čase a zatížení, Hits max amp (mV) [68].....	146
Obr. 128 P92-29 ze 22.5.2012 Hity na IPL kanálu 1 v závislosti na čase a zatížení, Hits risetime (us) [68]	146
Obr. 129 P92-35 ze 16.7.2012 Hity na IPL kanálu 3 v závislosti na čase a zatížení, Hits length (us) [68]	147
Obr. 130 P92-35 ze 16.7.2012 Hity na IPL kanálu 3 v závislosti na čase a zatížení, Hits max amp (mV) [68].....	147
Obr. 131 P92-35 ze 16.7.2012 Hity na IPL kanálu 3 v závislosti na čase a zatížení, Hits risetime (us) [68]	148
Obr. 132 County a 2 studované oblasti	149
Obr. 133 Oblast 1: Délka trvání hitů v závislosti na amplitudě síly	149
Obr. 134 Oblast 2: Délka trvání hitů v závislosti na amplitudě síly	150

Příloha 2 – Seznam použitých tabulek

Tab. 1 Naměřené hodnoty pro vzorky z ocele X14CrMoVNB10-2 [69].....	76
Tab. 2 Naměřené hodnoty pro vzorky z ocele P91 [69].....	77
Tab. 3 Naměřené hodnoty pro vzorky z ocele 22CrMoNiWV8-8 [69]	78
Tab. 4 Naměřené hodnoty pro vzorky z ocele 16537 [69].....	79
Tab. 5 Naměřené hodnoty pro vzorky z ocele X12Cr13 [69]	80
Tab. 6 Naměřené hodnoty pro vzorky z Ocele 6 [69].....	81
Tab. 7 Naměřené hodnoty pro vzorky z Ocele 7 [69].....	82
Tab. 8 Naměřené hodnoty pro vzorky z Ocele 8 [69].....	83
Tab. 9 Porovnání hodnot zkoušek tahem se SP testy po korelaci	85
Tab. 10 Naměřené hodnoty pro vzorky z Hliníku_3 [43]	88
Tab. 11 Naměřené hodnoty pro vzorky z Hliníku_7 [43]	89
Tab. 12 Naměřené hodnoty pro vzorky z Duralu [43]	90
Tab. 13 Naměřené hodnoty pro vzorky z Ocele [43].....	92

Tab. 14	Komplexní údaje o zkoušených vzorcích [43].....	106
Tab. 15	Výsledky small punch creep testů.....	108
Tab. 16	Chemické složení oceli P92.....	113
Tab. 17	Chemické složení ocele 15CH2NMFA.....	125
Tab. 18	Výsledky zkoušek tahem materiálu RP350 [53].....	126
Tab. 19	Přehled zkoušených vzorků [63].....	143
Tab. 20	Přehled zkoušených vzorků [63].....	144

Příloha 3 – Seznam publikací

- [1] VOLÁK, J.; MENTL, V.: Testing of Small Local Zones by means of Small Punch Test at Room and Creep Temperatures, Chem. Listy 104, s386-s389 LMV 2009, ISSN 0009-2770, Telč 2009
- [2] MENTL, V.; VOLÁK, J.; CHOCHOLOUŠEK, M.; KINDELMANN, P.: Korelace únavových charakteristik ocelí pro energetiku měřených na klasických a miniaturních zkušebních tělesech. Sborník 4. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách, Srní, pp. 254-257, říjen 2009
- [3] VOLÁK, J., MENTL, V., CHVOSTOVÁ, E.: Porovnání únavových charakteristik u vybraných typů materiálů a bronzi, Sb. konf. „Únava a lomová mechanika 2010“, 12.-15.4.2010, Žinkovy, ISBN 978-80-7043-885-5
- [4] VOLÁK, J., MENTL, V.: A Comparison of Fatigue Characteristics of Structural Steels Measured by means of Classic and Miniature Test Samples. CD-ROM Proceedings of The Ninth International Conference on Multiaxial Fatigue & Fracture ICMFF9, University of Parma, Parma (Italy), June 2010. ISBN 978-88-95940-31-1
- [5] BUNDA, Z., VOLÁK, J.: Porovnání mikrostruktury vybraných materiálů pro energetiku s výsledky zkoušek tečení, Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách, Sborník z 5. konference, ISBN 978-80-7043-931-9, Srní 19.-21. říjen 2010
- [6] BUNDA, Z., VOLÁK, J.: Comparison of microstructure of selected materials for power producing industry equipments before and after performed creep tests, pp. 363-367, Metal 2010, ISBN 978-80-87294-15-4, Rožnov pod Radhoštěm 18.-20. květen 2010
- [6] VOLÁK, J., MENTL, V.: Comparison of Fracture Toughness Values Determined by Standardized Method and Small Punch Test, 18th Europ. Conf. on Fracture, „Fracture of Materials and Structures from Micro to Macro Scale“, 30.8.-3.9.2010, Dresden, Germany
- [7] BUNDA, Z., VOLÁK, J.: Analýza prasklého potrubí a možnosti zlepšení v posuzování zbytkové životnosti, Přínos metalografie pro řešení výrobních problémů, ISBN 978-80-01-04822-1, Lázně Libverda 14.-16. červen 2011
- [8] BUNDA, Z., VOLÁK, J.: Improvement in rest residual lifetime evaluation, Metal 2011, ISBN 978-80-87294-22-2, Ostrava 18.-20. květen 2011

- [9] BUNDA, Z., VOLÁK, J.: Metody hodnocení životnosti energetických komponent, článek v časopise All for Power č. 4/2011, ISSN 1802-8535, Plzeň, duben 2011
- [10] BUNDA Z., VOLÁK, J.: Nové metody hodnocení životnosti energetických komponent, Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách, Sborník z 6. konference, ISBN 978-80-261-0031-7, Srní 18.-20. říjen 2011
- [11] BUNDA Z., KASL, J., VOLÁK, J.: Odhad zbytkové životnosti materiálu kotlových trubek, Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách, Sborník ze 6. konference, ISBN 978-80-261-0156-6, Srní 18. - 20. říjen 2011
- [12] BUNDA, Z., VOLÁK, J.: Nedestruktivní hodnocení materiálu energetických komponent, Defektoskopie 2011 – NDE for safety, ISBN 978-80-214-4358-7, Ostrava 9.-11. listopad 2011
- [13] VOLÁK, J., CHOCHOLOUŠEK, M., NOVÁK, M.: Determination of Fatigue Characteristics of Steel P92, METAL 2012, Brno 23.-25. 5. 2012, pp 827-830, ISBN 978-80-87294-31-4
- [14] KOULA, V., DRÁB, M., VOLÁK, J.: Defektoskopie 2012, Některé aspekty detekce únavových trhlin metodou akustické emise, Defektoskopie 2012, 30.10.-1.11.2012, Seč, CZ, ppt
- [15] BUNDA, Z., KASL J, VOLÁK, J.: Evaluation of residual lifetime of power plant parts, Metal 2012, ISBN 978-80-87294-29-1, Brno 23. – 25. květen 2012
- [16] VOLÁK, J., BUNDA, Z., CHVOSTOVÁ, E.: Comparison of results correlations of the steels P91, P92 and 15 313 after creep SP test, Metal 2013, ISBN 978-80-87294-39-0, Brno 15. – 17. květen 2013.
- [17] BUNDA, Z., VOLÁK, J., CHVOSTOVÁ, E.: Assessment of remaining lifetime of the boiler tube and microstructure analysis, Baltica 2013, Helsinki (FIN) 11. – 13. červen 2013.
- [18] VOLÁK, J., BUNDA, Z., MENTL, V.: Comparison of P92 steel fatigue test results in relation to specimen size and manufacturing, ASME 2013 Pressure Vessels and Piping Conference, Paris 14. – 18. červenec 2013.
- [19] Bunda, Z., Volák, J., Chvostová, E.: Comparison of results correlations of the steels P91, P92 and 15 313 after creep SP test. CD-ROM Conference METAL 2013 Proceedings, Tanger, Brno, 13. - 17. 5. 2013, ISBN 978-80-87294-39-0
- [20] Bunda, Z., Volák, J., Chvostová, E.: Assessment of remaining lifetime of the boiler tube and microstructure analysis. Flash disc – Baltica 2013, VTT, Helsinky-Finsko, p. 477-483, 11.- 13. 6. 2013, ISBN 978-951-38-8025-5
- [21] Volák, J., Bunda, Z., Mentl, V.: Comparison of P92 steel fatigue test results in relation to specimen size and manufacturing. CD-ROM ASME 2013 Pressure Vessels and Piping Conference (PVP 2013), ASME, Paris - France, July 14 – 18, 2013
- [22] BUNDA, Z., VOLÁK, J., CHVOSTOVÁ, E.: Assessment of remaining lifetime of the boiler tube and microstructure analysis, BALTICA 2013
- [23] VARNER, M., KOULA, V., VOLÁK, J.: Influence of instrumentation imperfections on SPT results, str. 221-228, 5. – 7. 11. 2013, ISBN 978-80-214-4799-8, Defektoskopie 2013

- [24] BUNDA, Z., VOLÁK, J.: Využití výsledků zkoušek Small Punch v kombinaci s metodami NDT, str. 9-15, 5. – 7. 11. 2013, ISBN 978-80-214-4799-8, Defektoskopie 2013
- [25] BUNDA, Z., VOLÁK, J.: Metody hodnocení životnosti energetických komponent, Kotle 2013, 17. – 19. 3. 2014, Brno
- [26] VOLÁK, J., BUNDA, Z., CHVOSTOVÁ, E.: Assessment of remaining lifetime of the boiler tube and microstructure analysis, 5. -7. 5. 2014, Roma, Italy
- [27] VOLÁK, J., BUNDA, Z.: Comparison of P92 steel fatigue test results in relation o specimen size and manufacturing, Metal 2014, 21. -23. 5. 2014, Brno
- [28] VLAŠIC, F., VOLÁK, J., NOHÁL, L., MAZAL, P., HORT, F.: Study of Initial Stages of Fatigue Process Using Non-destructive Testing Methods, Key Engineering Materials Vols. 592-593 (2014) pp 553-556 © (2014) Trans Tech Publications, Switzerland doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.592-593.553
- [29] KOULA, V., VOLÁK, J., DRÁB, M., VLAŠIC, F., SLUNÉČKO, T.: Utilization of Non-Destructive Methods for Monitoring Fatigue Crack Growth in Power Plant Material, ECNDT Praha 2014- vyjde
- [30] VOLÁK, J.: Relaxace niklové slitiny ALLVAC 718 (typ INCONEL 718), výzkumná zpráva VYZ 1023/2007
- [31] 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, výzkumná zpráva VYZ 1125/2008
- [32] MENTL, V., VOLÁK J., CHVOSTOVÁ E., FIALA J., CHOCHOLOUŠEK M., HADRAVA J., Výsledky měření rtg-difrakce slitin po zkouškách únavy, výzkumná zpráva VYZ 1124/2008
- [33] MENTL, V., VOLÁK J., CHVOSTOVÁ E., CHOCHOLOUŠEK M., Využití instrumentovaných zkoušek tvrdosti při hodnocení mechanických vlastností ocelí-3, výzkumná zpráva VYZ 1126/2008
- [34] VOLÁK, J., MENTL, V., CHVOSTOVÁ, E., SOBOL, O.: „SMALL PUNCH TEST“ – Hodnocení lomové houževnatosti, výzkumná zpráva VYZ 1127/2008
- [35] VOLÁK, J.; MENTL, V.: Vliv tvaru vzorku typu „Small Punch“ na výsledky zkoušek únavy, výzkumná zpráva, VYZ 1212/2009, Plzeň, prosinec 2009
- [36] VOLÁK, J., FIKERLE, E.: Modernizace creepové laboratoře, Výzkumná zpráva VYZ 1199/2009
- [37] MENTL, V., VOLÁK, J., CHVOSTOVÁ, E.: Provádění zkoušek Small Punch v chladící komoře. Výzkumná zpráva ŠKODA VÝZKUM s.r.o., VYZ 1210/2009, Plzeň, prosinec 2009
- [38] MENTL, V., FIALA, J., VOLÁK, J., CHOCHOLOUŠEK, M., CHVOSTOVÁ, E: Hodnocení degradace konstrukčních slitin prostřednictvím rentgenové difrakce. Výzkumná zpráva ŠKODA VÝZKUM s.r.o., VYZ 1211/2009, Plzeň, prosinec 2009

- [39] VOLÁK, J.: Kompletní modernizace creepové laboratoře, výzkumná zpráva VYZ 1311/2010, Plzeň, prosinec 2010
- [40] FIALA, J., MENTL, V., VOLÁK, J.: Hodnocení degradace materiálů a zbytkové životnosti, výzkumná zpráva VYZ 1312/2010, Plzeň, prosinec 2010
- [41] VOLÁK, J., MENTL, V.: Vliv velikosti, obrobení a tvaru vzorku na výsledky zkoušek únavy malých vzorků, výzkumná zpráva, VYZ 1313/2010, Plzeň, prosinec 2010
- [42] VOLÁK, J., KASL, J.: Boiler Tube Failure Analysis & Assessment of Tube Remaining Life, výzkumná zpráva VYZ/TZ/ 52/196/2010
- [43] NOVÁK, M., VOLÁK, J., CHOCHOLOUŠEK, M., MENTL, V.: Hodnocení mechanických vlastností konstrukčních materiálů prostřednictvím miniaturních zkušebních těles, výzkumná zpráva VYZ 1374/11
- [44] Volák, J., Chocholoušek, M.: Stanovení únavových charakteristik oceli P92, výzkumná zpráva VYZ 1373/11
- [45] MENTL, V., KAISER, J., VOLÁK, J.: Stanovení mechanických charakteristik ocele P92, Zpráva č. 15/2011/KMM
- [46] NOVÁK, M., VOLÁK, J., CHOCHOLOUŠEK, M., MENTL, V., CHVOSTOVÁ, E.: Hodnocení mechanických vlastností konstrukčních materiálů prostřednictvím miniaturních zkušebních těles, výzkumná zpráva VYZ 1374/11
- [47] VOLÁK, J., CHOCHOLOUŠEK, M.: Dynamické zkoušky materiálové kombinace COST F+16537, výzkumná zpráva VYZ 1435/12
- [48] MENTL, V., VOLÁK, J., KAISER, J.: Stanovení creepových charakteristik ocele P92, technická zpráva ZČU, č. 11/2012/ KMM
- [49] VOLÁK, J.: Stanovení únavových charakteristik oceli 15CH2NMFA, výzkumná zpráva VYZ-VZ-53/13/1524
- [50] VOLÁK, J.: Program TIP - MPO, projekt FR - TI2/447, „Provozní analyzátor únavového poškození strojních dílů, využívající akustickou emisi“ Výzkumná zpráva 2/4/2013 Zkoušky nízkocyklové únavy oceli P92

Příloha 4 – Seznam fukčních vzorů

VOLÁK, J.: Modifikace Charpyho kladiva za účelem provádění rázových zkoušek v tlaku, VYZ/TGZ 53/19/11

VOLÁK, J.: Přípravek pro provedení dynamických zkoušek Small Punch, VYZ/TGZ 53/17/11

BROŽÍK, M., VOLÁK, J., DŽUGAN, J., MENTL, V.: Modifikace Charpyho kladiva za účelem provádění rázových zkoušek tahem, zpráva č. 17/2011/ KMM

KAŠPAROVÁ, M., ZAHÁLKA, F., VOLÁK, J.: Přípravek pro měření odolnosti žárově stříkaných povlaků proti namáhání stříhem, VYZ/TGZ 81/12/10

VOLÁK, J. : Upínací čelisti pro vzorky únavy na malých vzorcích, Chladicí komora pro Small Punch, Vypracováno v rámci výzkumného záměru MŠMT ČR: MSM 4771868401, „Výzkum provozní degradace konstrukčních materiálů“, VYZ/TGZ 53/1/2008

VOLÁK, J., MENTL, V.: POS-AZL/15-53/012- Stanovení meze pevnosti Small Punch testem, akreditovaný zkušební postup, platnost od 23.2.2010