

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

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

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Měření mechanických vlastností konstrukčních materiálů pomocí
miniaturních zkušebních vzorků

Autor: **Bc. Radek Procházka**

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

Akademický rok 2012/2013

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....
podpis autora

Poděkování

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

Tato diplomová práce vznikla za podpory projektu ESF OP VpK „Posílení spolupráce mezi vysokými školami, výzkumnými ústavami a průmyslovými partnery v Plzeňském kraji - CZ.1.07/2.4.00/17.0052“. Tento projekt napomohl při propojení výstupů diplomové práce mezi aplikačním a akademickým prostředím.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Procházka	Jméno Radek	
STUDIJNÍ OBOR	Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Prof. Ing. Mentl, CSc.	Jméno Václav	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KKM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Měření mechanických vlastností konstrukčních materiálů pomocí miniaturních zkušebních vzorků		

FAKULTA	strojí	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2013
----------------	--------	----------------	-----	------------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	79	TEXTOVÁ ČÁST	60	GRAFICKÁ ČÁST	19
---------------	----	---------------------	----	--------------------------	----

STRUČNÝ POPIS	Práce se zabývá zkušebními technikami, umožňující získat charakteristické mechanické vlastnosti konstrukčních materiálů za pomoci malého objemu zkušebního materiálu. Miniaturizované zkušební techniky byly vyvinuty před 30 lety prvotně pro jaderný průmysl. Jejich aplikace je vhodná pro hodnocení zbytkové životnosti, při zjišťování provozních poruch, svařenců, povlaků atd. Avšak dnes je jejich aplikace mnohem širší a nevztahuje se pouze na oblast jaderného průmyslu. Lze ji tedy uplatnit i pro běžné konstrukční materiály.
KLÍČOVÁ SLOVA	Small Punch Test, lomová houževnatost, hodnocení zbytkové životnosti, lomová energie, mikro-tahová zkouška, tahová zkouška, napětí, deformace.

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Procházka	Name Radek	
FIELD OF STUDY	Materials Engineering and Engineering Metallurgy		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Mentl,CSc.	Name Václav	
INSTITUTION	ZČU - FST – KKM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Determination of Mechanical Properties of Structural Materials by using Miniature Specimen Test Techniques		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2013
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	82	TEXT PART	60	GRAPHICAL PART	19
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION	The thesis deals with miniature specimen test techniques enable (which make it possible) to determine mechanical properties of structural materials by using of small volume of the material. The miniature specimen test techniques were developed primarily for the nuclear industry about 30 years ago. Their application in the field of remaining life assessment, failure analysis, properties of weldments, coatings etc. is very promising. The area of their use is not only for these purposes in the nuclear field but today also for common structural materials.
KEY WORDS	Small Punch Test, Fracture toughness, Remaining life assessment, Fracture energy, Micro-Tensile Test, Tensile est, Stress, Strain.

Obsah

1. Úvod.....	3
2. Cíle	4
3. Klasické měření mechanických vlastností	5
3.1 Mechanické vlastnosti	5
3.2 Rozdělení mechanických zkoušek.....	6
3.2.1 Destruktivní.....	6
3.2.2 Nedestruktivní a semi-destruktivní	7
4. Metody měření mechanických vlastností na miniaturních vzorcích	8
4.1 Small Punch Test	8
4.2 Micro-Tensile Test	18
5. Speciální odběrová a měřicí zařízení	19
5.1 Odběrová zařízení.....	19
5.2 Měřicí zařízení	20
5.2.1 Kontaktní měřicí metody (mechanické).....	20
5.2.2 Bezkontaktní měřicí metody (optické).....	21
6. Úvod do experimentu	29
7. Výběr materiálu.....	30
7.1 Laboratorní materiál	30
7.2 Materiál reálné konstrukce	30
8. Výběr experimentálních metod	31
8.1 Provedení zkoušek Small Punch Test.....	31
8.1.1 Stanovení přechodové teploty T_{SP}	31
8.1.2 Stanovení meze kluzu.....	34
8.1.3 Stanovení meze pevnosti	35
8.1.4 Stanovení parametrů lomové houževnatosti J_{IC}	35
8.1.5 Stanovení faktoru intenzity napětí K_{IC}	37
8.2 Provedení zkoušek Micro-Tensile Test	37
8.2.1 Analýza geometrie vzorku	37
8.2.2 Stanovení vhodného postupu výroby	39
8.2.3 Návrh a výroba upínacích čelistí.....	39
8.2.4 Měření podélné deformace.....	40
8.2.5 Vyhodnocení kontrakce Z	44
9. Výsledky klasických a netradičních zkoušek.....	48
9.1 Standard Tensile Test	48

9.1.1	Ocel 16 343	48
9.1.2	ZM1, ZM2 a svarový kov	49
9.2	Small Punch Test	51
9.3	SPT – přechodová teplota T_{SP}	51
9.4	SPT – mez kluzu a mez pevnosti	54
9.5	SPT – lomová houževnatost	56
9.6	Micro-Tensile Test	56
9.6.1	Stanovení kontrakce pro M-TT	57
9.6.2	M-TT - mechanický průtahoměr	58
9.6.3	M-TT - Videoextensometer	60
10.	Porovnání výsledků klasických a netradičních zkoušek	62
10.1	Small Punch Test	62
10.1.1	SPT vs STT	62
10.1.2	SPT vs Lomová houževnatost J_{IC}	62
10.1.3	SPT vs Faktor intenzity napětí K_{IC}	63
10.2	Micro-Tensile Test	64
10.2.1	M-TT vs STT - mechanický průtahoměr	64
10.2.2	M-TT vs STT - Videoextensometer	65
11.	Diskuse výsledků	66
11.1	Small Punch Test	66
11.2	Micro-Tensile Test	66
12.	Závěr	68
13.	Seznam obrázků	70
14.	Seznam tabulek	72
15.	Literatura	73

1. Úvod

Pro měření mechanických vlastností je nutné užít zkoušek či postupů, které svým charakterem umožní získat tyto požadované vlastnosti o daném materiálu, konstrukci a případně dalších předmětech zájmu. Nejedná se tedy jen o úkony, které pomohou při zjišťování, který z daných zkušebních objektů je tužší, pevnější, houževnatější apod., ale také o úkony, které umožní získat potřebné hodnoty. (Bude-li třeba, tak i záznam dat z průběhu těchto měření, z nichž se následně vyhodnotí mechanické vlastnosti).

Měřením mechanických vlastností materiálů lze stanovit např. tranzitní teploty, zbytkovou životnost konstrukcí, pevnostní charakteristiky pro návrh konstrukcí aj.

Právě měření stávajících mechanických vlastností výrobků se v dnešní době značnou měrou podílejí na celkovém objemu zkušebních technik. Cílem metod je zjistit aktuální stav výrobku a na tomto základě tak stanovit jeho životnost. Tato problematika je silně svázána s problémy, týkajícími se samotné podstaty provedení mechanických zkoušek – destrukce zkušebního materiálu – destrukce výrobku. V mnohých případech není možné odebrat dostatečné množství reprezentativního materiálu, aby mohl být proveden zkušební test, aniž by se výrobek nepoškodil. V drtivé většině metod měření mechanických vlastností konstrukčních materiálů je na konci testu výrobek i vzorek zničen. Tyto metody řadíme do skupiny destruktivních.

Aby vůbec došlo k progresi v metodikách měření mechanických vlastností, měly by se zkoušky pohybovat v oblastech, kde již nebude potřeba znehodnotit zkušební materiál či výrobek. Tyto oblasti se řadí do skupiny nedestruktivních. Nicméně nedestruktivní metody mají své nároky, omezení a z toho vyplývající užší aplikovatelnost než metody destruktivní. Proto se zde otevírá možnost pro volbu, která svým charakterem odběru materiálu neznehodnotí výrobek. Podmínkou je, aby samotný odběr neměl vliv na celkovou funkčnost součásti. Z takto odebraného objemu materiálu se následně provede destruktivní test. Pokud hovoříme o kombinaci obou předchozích metod, tedy že po odebrání reprezentativního objemu materiálu nedojde k porušení funkčnosti ani omezení provozu výrobku, hovoříme o metodě semi-destruktivní.

Předmětem této práce je prozkoumat možnosti aplikace dvou představitelů semi-destruktivních metod, a to SPT (Small Punch Test) a M-TT (Micro-Tensile Test).

Důvodů, proč by se měla omezit velikost odebraného materiálu, případně snížit samotný objem testovaného vzorku, je několik:

- Při odebrání dostatečného množství reprezentativního materiálu s geometrií, která nezpůsobí narušení konstrukce součásti, lze zabránit závažnému poškození výrobku.
- Není nutné odběrová místa nikterak opravovat ani omezovat parametry provozu. Tento postup se využívá k zjišťování zbytkové životnosti zařízení a jsou zde kladeny vyšší nároky na odběrová zařízení.
- Možnost provést zkoušky z již provedených zkoušek, které se nepodařilo z jakékoliv příčiny dokončit. Například z důvodů technické poruchy na zkušebním či měřicím zařízení, ztrátě dat nebo jen nepozorností obsluhy. V těchto případech je stále možné provést test znovu, a to z dosud neporušených míst původního vzorku.
- Mezi nesporné výhody patří možnost umístit a orientovat vzorek i u velmi tenkých materiálů, povlaků, trubek o malé světlosti, míst s gradienty vlastností a i u svařenců. Zde je možnost i v relativně úzkých oblastech měřit mechanické vlastnosti v libovolné části tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje.

2. Cíle

Práce je zaměřena na aplikaci nestandardních postupů při měření mechanických vlastností konstrukčních materiálů. Tyto vlastnosti lze získat za pomoci miniaturizovaných zkušebních vzorků. Vybranými představiteli semi-destruktivních metod jsou:

- a) Small Punch Test je zkouška založená na protlačování kuličky miniaturním tělískem diskového tvaru. SPT je založena na porovnání výsledků s výsledky ze standardních mechanických zkoušek a stanovení příslušných korelačních koeficientů. Cílem je prokázat, zda je možné stanovit pro konkrétní materiály obecný korelační vztah, jenž by mohl být aplikovatelný na širší pole kovových materiálů. Tyto vztahy slouží pro získání meze kluzu a meze pevnosti. Dále je cílem získané koeficienty porovnat s dosud publikovanými výsledky. Mechanické vlastnosti naměřené touto metodou jsou získány nepřímo.
- b) Micro-Tensile Test je zkouška tahem na miniaturních zkušebních tělesech. V rámci miniaturních technik měření mechanických vlastností konstrukčních materiálů, by měly výsledky M-TT korespondovat s výsledky standardní tahové zkoušky (STT). Protože neexistuje žádný dostupný zdroj, který by popisoval tuto problematiku, je potřeba stanovit:
 - geometrii vzorku,
 - způsob měření deformací,
 - mechanismus upínání vzorku (čelisti),
 - postup přípravy vzorku a
 - postup vyhodnocení.

V případě metody M-TT jsou cíle zcela zjevné a plynou z výše uvedených. Metoda by měla svým charakterem korespondovat s výsledky ze STT s minimálními odchylkami od stávajících standardních postupů testování, vyhodnocování výsledků a výroby vzorků. Tedy metoda M-TT by měla umožňovat měření veškerých mechanických vlastností materiálu stejně tak, jak je tomu v případě STT. Mechanické vlastnosti naměřené touto metodou jsou získány přímo, bez použití korekčních vztahů.

3. Klasické měření mechanických vlastností

Mechanické zkoušky se zabývají měřením mechanických vlastností materiálů, jež jsou stanoveny odpovídajícími mechanickými zkouškami.

Lze konstatovat, že klasické standardizované mechanické zkoušky reprezentují stávající postupy při získávání mechanických vlastností. Zkoušky charakterizuje nejen relativně velký objem materiálu potřebný k získání reprezentativního objemu vzorku, jenž ve většině případů nelze odebrat ze zařízení, které je v provozu, aniž by bylo nutné provést následnou opravu, např. svařováním, ale v mnohých případech jsou také metody měření vybudovány na fyzikálních základech či jsou dostatečně probádané na základech experimentálních. [1]

3.1 Mechanické vlastnosti

Mechanickými vlastnostmi se rozumí soubor parametrů, hodnot a veličin charakterizujících chování materiálů za působení určitého namáhání, které je důsledkem působení vnějších sil a okolního prostředí (teplota, koroze, radiace apod.). Mechanické vlastnosti, lépe řečeno jejich charakteristiky spolu s velikostí a charakterem namáhání umožňují dimenzovat důležité komponenty konstrukcí a stanovit jejich funkční spolehlivost, která vymezuje tzv. mezní stav. Mezní stav je určen situací, kdy součást či konstrukce ztrácí schopnost plnit funkci, ke které byly určeny. Mezní stavy ovlivňují faktory vnější (tvar a rozměry, časový průběh zatěžujících sil, charakter prostředí, teplota) i vnitřní (chemické složení a struktura materiálu, rozsah výrobní a provozní degradace, apriorní defekty), [1]. Základní mechanické vlastnosti jsou následující:

- Pružnost

Těleso se působením napětí deformuje a po odstranění tohoto napětí se vrací do původní polohy.

- Pevnost

Je definována jako vnější napětí, kterého je třeba k rozdělení materiálu na dvě části.

- Tvrдость

Vyjadřuje odolnost povrchu hmoty proti místnímu porušení vnikáním cizího tělesa.

- Tvárnost

Schopnost hmoty měnit v tuhém stavu bez porušení soudržnosti vzájemnou polohu částic působením vnějších sil.

- Houževnatost

Je vyjádřena velikostí práce, potřebné k rozdělení hmoty na dvě a více částí, je protikladem křehkosti, [2].

3.2 Rozdělení mechanických zkoušek

Primárním cílem mechanických zkoušek je stanovení mechanických vlastností, které jsou podkladem pro pevnostní výpočty strojních součástí. Ke zkouškám se používá speciálních zkušebních strojů a zařízení. Pro zajištění reprodukovatelnosti výsledků je nutno provádět zkoušky jednotným způsobem (předepsanou normou), [2]. Můžeme je rozdělit, podle míry poškození posuzované součásti, na metody:

- destruktivní,
- nedestruktivní a semi-destruktivní.

3.2.1 Destruktivní

Mechanické hodnoty jsou získány přímo. Zkoušky jsou nejčastěji děleny s ohledem na nejvýznamnější činitele působící na mechanické vlastnosti, které jsou:

a) způsob zatěžování

- Statické (quasi - statické)

Zatěžování předpokládá působení stálých a pomalu spojitě se měnících sil. Dle druhu namáhání se rozdělují na tahové, tlakové, ohybové, krutové, stříhové, a to za teplot pokojových, tak i za zvláštních fyzikálních podmínek.

- Dynamické

- Zkoušky dynamické rázové

Dochází k plastické deformaci zkušební tyče (významný vliv vnějších činitelů teploty a rychlosti deformace), kde zatěžující síla působí rázem. To zahrnuje zkoušky rázem v ohybu, tahu, tlaku a krutu.

- Zkoušky dynamické cyklické

Působení kmitavého zatěžování. Časově proměnlivé síly, které působí dynamicky a opakovaně, jejichž rychlost je dána počtem cyklů za jednotku času. Zkoušky únavy nebo zkoušky rychlosti šíření únavových trhlin. [2]

- Zkoušky při vysokých rychlostech zatěžování (výbuchy, vojenské aplikace, rychlosti ve stovkách m/s). [3]

b) fyzikální podmínky zkoušky

- zkoušky za normálních teplot (či pokojové teploty, cca 20°C)
- zkoušky za snížených teplot
- zkoušky za zvýšených teplot

c) stav napjatosti

- Zkoušky při jednoosé napjatosti (statické i dynamické zkoušky tahem, tlakem a ohybem za normálních i jiných teplot, creepové a únavové zkoušky zkušebních tyčí).
- Zkoušky při rovinné napjatosti (např. zkoušky smykem a stříhem, zkoušky tenkostěnných trubek vnitřním přetlakem atd.).
- Zkoušky při prostorové napjatosti (zkoušky těles s vruby a trhlinami, tedy také zkoušky rázem v ohybu tyčí s vruby, zkoušky dynamické lomové houževnatosti, zkoušky kombinovaným namáháním, např. kombinací tahu nebo ohybu a krutu apod.). [2]

3.2.2 Nedestruktivní a semi-destruktivní

Ze zkoušek bez porušení mají ve strojírenské výrobě největší význam nedestruktivní (defektoskopické) zkoušky. O nedestruktivních metodách zkoušení se hovoří tehdy, nedojde-li k porušení ve vztahu ke zkušebnímu vzorku a konstrukci. Zkoušky lze provádět přímo na výrobku. Tímto způsobem lze zjistit defekty pod povrchem i uvnitř zkoušeného materiálu, nebo výrobku. Odhalením vad nadkritických rozměrů lze zabránit náhlému křehkému nebo únavovému porušení, které by nastalo následným provozem součásti s touto vadou. Mezi tyto metody patří:

- zkoušky prozařovací,
- zkoušky zvukem a ultrazvukem,
- zkoušky magnetické a elektrické a
- zkoušky kapilární atd.

Zkoušky jsou schopné odhalit necelistvosti, určit jejich velikosti a rozmístění v materiálu. Co však obecně není možné stanovit na základě těchto typů zkoušek, jsou mechanické vlastnosti. [2]

Semi-destruktivní zkoušky se vyznačují nedestruktivním odběrem zkušebního materiálu z funkční součásti či konstrukce a destrukcí zkušební vzorku. Charakteristikou metody je miniaturizace zkušebních vzorků. Zkušební vzorky jsou v těchto případech přizpůsobeny velikosti odebraného materiálu. Vzorky, postupy provedení a vyhodnocení zkoušek nejsou dosud standardizovány. Mezi tyto metody patří např.:

- Small Punch Test,
- Micro-Tensile Test a
- Miniaturized Charpy Test atd.

Mechanické vlastnosti (3.2) je možné získat přímým, nebo nepřímým měřením.

4. Metody měření mechanických vlastností na miniaturních vzorcích

Metody pracují s miniaturními objemy zkušebních vzorků, které jsou v průběhu provedení zkoušek porušovány až do destrukce. Z tohoto pohledu se jedná o zkoušky destruktivní. Na druhou stranu, z pohledu odběru reprezentativního množství materiálu z funkční konstrukce se jedná o metodu nedestruktivní, nedojde ke ztrátě funkčnosti konstrukce. Proto je na tyto miniaturní zkoušky pohlíženo jako na semi-destruktivní. Největšího významu nabývá při hodnocení zbytkové životnosti a souvisí se snížením nákladů provozovatelů těchto zařízení.

Rozměry vycházejí z vnějších rozměrů zkušebních vzorků pro metodu SPT. Metody SPT a M-TT nejsou v současné době standardizovány, nicméně v případě SPT došlo alespoň k úmluvě „Code of Practice“ (dále jen CoP) vypracované v rámci aktivit pracovní skupiny CEN. Výchozí vzorky tedy odpovídají rozměrům uvedeným v pracovním postupu metody SPT pro vnější průměr 8 mm. [4]

SPT ve srovnání s metodou M-TT, kde jsou mechanické hodnoty získány přímo, je ve fázích přípravy, testování a vyhodnocování, složitější a pracnější. Metoda vyžaduje soustředěnost mnoha výpočetních operací pro jedno řešení a mnoho přípravků. Mechanické hodnoty získané metodou SPT jsou tedy nepřímé. Důležitým faktorem je stav povrchu vzorku. Je důležité, aby stav povrchu přímo či nepřímo neovlivňoval hodnoty mechanických vlastností.

4.1 Small Punch Test

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

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 vnikajícím tělískem – indentorem do porušení. Podpora po obvodu disku může existovat jako pouhé podepření nebo je disk po obvodu pevně upnutý (vetknutý) tlakovou přítlačnou silou.

Základním cílem výzkumu zkušební metody SPT je její aplikace pro hodnocení integrity konstrukcí, rozsahu provozní degradace a odhadu zbytkové životnosti ocelových komponent energetických zařízení. [4]

Penetrační testy můžeme rozdělit na [4]:

- a) ohybový test (Disc Bend Test),
- b) stříhový test (Shear Punch Test) a
- c) kuličkový test (Bulge Test).

Hlavní přednosti:

- nedestruktivní hodnocení mechanických vlastností materiálu z pohledu odběru materiálu,
- hodnocení nových materiálů či slitin, u kterých je k dispozici pouze omezené množství materiálu,
- hodnocení svařenců včetně svaru a tepelně ovlivněných oblastí uvnitř základního kovu,
- hodnocení mechanických vlastností keramických materiálů v širokém rozmezí teplot,
- hodnocení mechanických vlastností povlaků a povlakovaných materiálů,
- analýza příčin lomů součástí, nebo jiných případů, u nichž je omezena dostupnost materiálů,
- významné snížení nákladů provozovatelům energetických zařízení v souvislosti s opravami, [4].

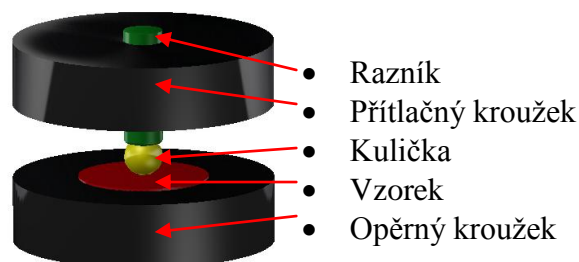
Hlavní nedostatky:

- v současnosti nelze spolehlivě vysvětlit, jak výsledky testu závisí na konkrétních zkušebních podmínkách,
- mnoho empirické zkušební metodiky a rovněž neuniverzálnost korelací,
- všechna použití v předchozích letech zvažovala pouze feritické a martenzitické oceli, nikoliv austenitické, nedostatečně prozkoumáno v oblastech svarových spojů.

Jedná se o efektivní metodu, která je schopna poskytovat hodnoty mechanických vlastností materiálů v kontrastu s nepřímými měřeními, které používají rentgen, ultrazvukových či magnetických technik, [4].

• Pracovní postup pro Small Punch (Bulge) Test

Použití metody Small Punch Bulge Test (pro zjednodušení jen SPT) má svá specifika, které je dobré dodržet. V tomto případě se používá kuličky, která je z jedné strany přímo v kontaktu s razníkem a z druhé se vzorkem. Zkušební těleso je pevně upnuté (vetknutí) mezi přítlačným a opěrným kroužkem (**Obr. 4.1**) způsobem zajišťujícím opakovatelnost zkušebních podmínek. Složený přípravek se umístí do zkušebního zařízení a vzorek se předzatíží. Cílem zkoušky je získat záznam závislosti posuvu razníku nebo průhybu zkušebního disku na působící síle. Proto je nutné zajistit záznam deformace a zatížení v průběhu celého testu vhodnou metodou. [4, 5]



Obr. 4.1 Model sestavy přípravku SPT

Způsob provedení je doporučen CoP, a to proto, aby se výsledky získané na různých pracovištích minimálně lišily. Na každém institutu tak je, aby zvolil vhodný přípravek, metodu měření deformace, zkušební teplotu, prostředí, zatížení atd. Pojmy definované v CoP jsou [4]:

- Zkušební těleso

Zkušební těleso má obvykle tvar disku daných rozměrů. Může se jednat o homogenní materiál nebo může vzorek charakterizovat technologii, např. svary, defekty, povlaky apod.

- Zkušební zatížení

Zatížení na zkušební disk může působit prostřednictvím mechanicky ovládaného nebo hydraulicky ovládané zátěžného elementu, přičemž přednost je dáována zatěžování, které probíhá řízenou deformací.

- Teplota zkoušky

SPT probíhá obvykle za okolní (pokojové) teploty, nicméně všeobecné zde uvedené principy platí rovněž pro zkoušky za snížených i zvýšených teplot. Předpoklad konstantní teploty v průběhu celé zkoušky.

- Okolní prostředí

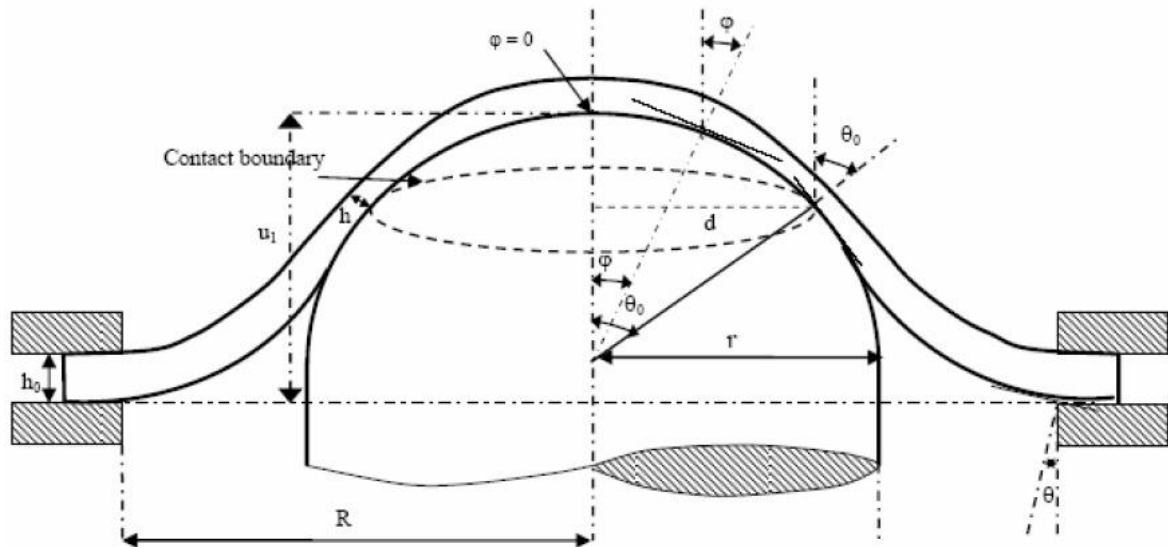
Zkouška je obvykle realizována v normálním laboratorním prostředí (vzduch, přirozená vlhkost), nicméně tyto všeobecné principy jsou aplikovatelné i v jiném zkušebním prostředí.

- Záznam zkoušky

Důležitými záznamy jsou záznamy síly, posuvu razníku, průhybu zkušebního tělíska a zkušební teploty v celém průběhu zkoušky. Navíc je nutno zaznamenat veškeré změny v řízení zkoušky, změny zkušebních podmínek a také všechny okolnosti, které vedly k přerušení průběhu zkoušky. [4]

• Vyhodnocení výsledků

Aby bylo možné získat křelační koeficienty z porovnání výsledků SPT a STT, bylo navrženo několik modelů výpočtů napětí, které působí na SP vzorek. Většina z nich není jednoduše aplikovatelná. Důvodem je jednak definice ekvivalentního napětí při SP zkoušce, která by vyžadovala podrobnou matematickou analýzu, jednak chybí znalost několika ne zcela jednoduše dostupných materiálových parametrů. Existují také četné relativně jednoduché vztahy, u nichž ekvivalence napětí je založena na stanovení obvodového membránového napětí, které způsobí porušení SP disku. Příslušné geometrické veličiny jsou definovány na **Obr. 4.2**.



Obr. 4.2 Schéma geometrických parametrů pro metodu Small Punch Test [4]

F_{SP}	síla působící na SP vzorek [N]
σ	maximální napětí působící na vzorek SPT [MPa]
r_{SP}	poloměr vnikajícího tělesa (1,25 mm)
R_{SP}	poloměr otvoru opěrného kroužku (2 mm)
h	konečná tloušťka vzorku SPT v místě lomu [mm]
h_0	původní tloušťka vzorku SPT (0,5 mm)
θ	úhel svírající spojnici středu kuličky v místě dotyku s diskem s osou kuličky
ϕ	úhel mezi osou zatížení a normálou k povrchu disku v inflexním bodě

1) Přehled jednoduchých jednodimenzionálních SPT korelačních vztahů pro výpočet napětí:

- a) vzájemný vztah, který navrhl Bicego v evropském projektu COPERNICUS, zabývající se metodou SP test [4]

$$F_{sp} / \sigma = [2\pi(r_{SP} + h/2)\sin\phi]\sin\phi \quad (1)$$

- b) formulace podle Dobeše a Miličky

$$F_{sp} / \sigma = \frac{[2\pi r_{SP} h \cdot \tan\theta]}{[1 + \tan^2 \cdot \theta]^{1/2}} \quad (2)$$

- c) rovnice navržená podle Chakabartyho

$$F_{sp} / \sigma = 2\pi r_{SP} \cdot \sin^2 \phi \cdot h_0 \cdot \left\{ \frac{1 + \cos \phi}{1 + \cos \theta} \right\}^2 \quad (3)$$

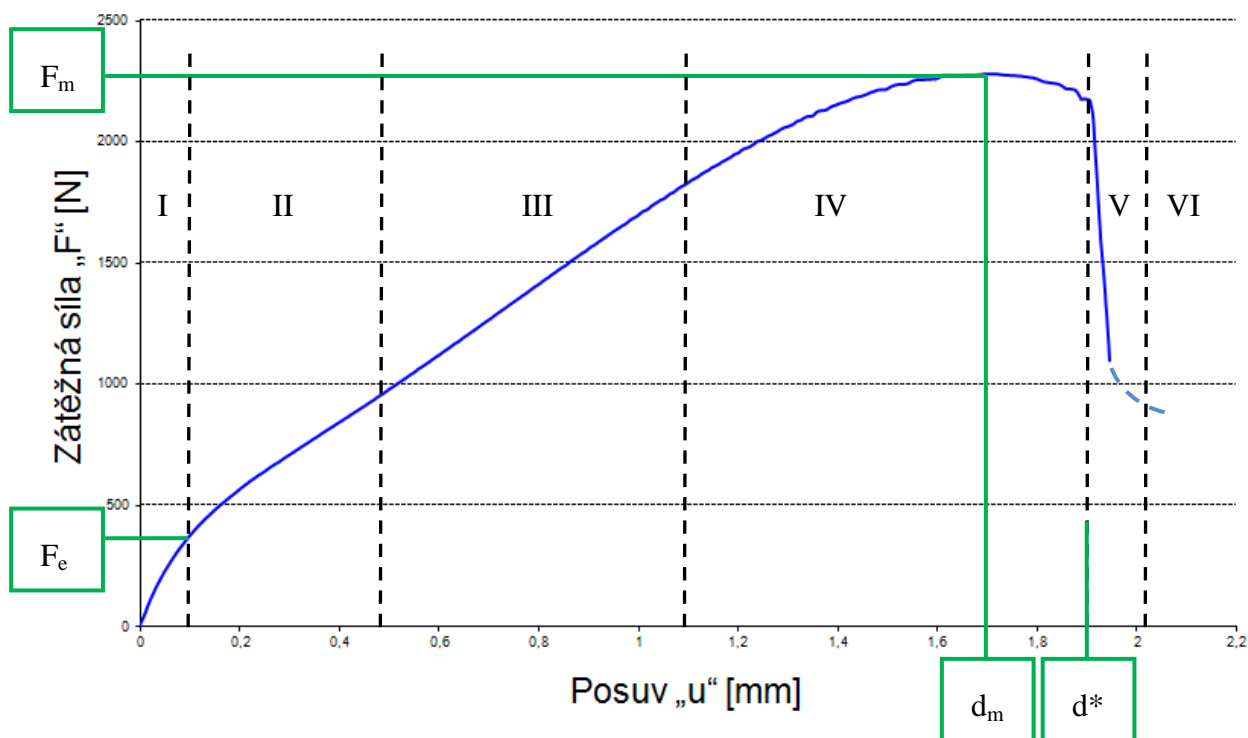
- d) předpis odpovídající CoP

$$F_{sp} / \sigma = 3.33 k_{sp} R_{SP}^{-0,2} r_{SP}^{1,2} h_o \quad (4)$$

k_{sp} koeficient při použití pevného připevnění disku [5]

2) Vyhodnocení pevnostních a deformačních charakteristik a vyhodnocení odolnosti proti porušení křehkým lomem

Typický záznam SPT je znázorněn na **Obr. 4.3**. Tato závislost může být rozdělena do několika částí. Část I je především charakterizována elastickými vlastnostmi materiálu, část II odráží přechod mezi elastickým a plastickým chováním, část III vykazuje zpevňovací vlastnosti až do části IV, kde dochází k odpevňovacím procesům až do části V, kde nastává lom. Dále dochází jen k posuvu razníku hlouběji do již porušeného vzorku až do části VI. [7]



Obr. 4.3 Typický záznam závislosti zátěžné síly na posuvu pro metodu SPT

F_m maximální síla dosažená v průběhu zkoušky [N]

F_e síla charakterizující přechod od lineárního chování materiálu ke stavu charakterizovanému rozvojem plastických makrodeformací [N]

d_m posuv razníku odpovídající maximálnímu zatížení [mm]

d^* posuv razníku odpovídající místu lomu [mm]

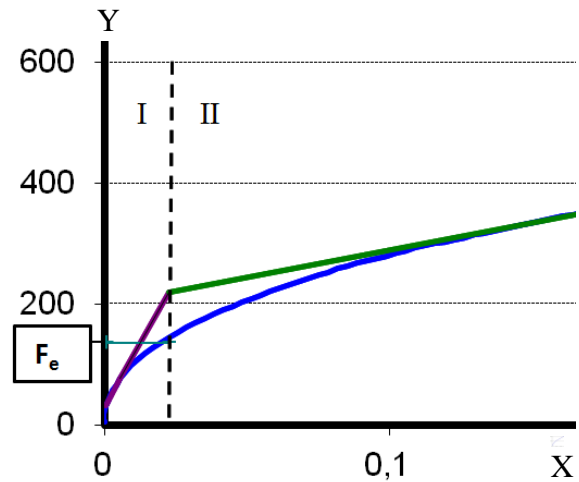
E_{SP} energie vyhodnocená z plochy pod křivkou [J] [4]

1) Stanovení hodnot R_e a R_m

a) Stanovení hodnot R_e

Pro získání hodnot R_e , je třeba vycházet ze záznamu zkoušky (zátěžná síla – posuv) SPT, tedy není možné získat tyto hodnoty přímo ze zkušebního stroje. Korelace jsou prováděny s výsledky ze standardních tahových zkoušek.

Stanovení hodnot R_e vyžaduje zaměření na oblasti I a II dle **Obr. 4.3**, respektive **Obr. 4.4**. Data obou oblastí se proloží lineární regresní křivkou. Bod, který vznikne protnutím obou křivek, je bodem, jenž charakterizuje přechod mezi lineární a plastickou deformací materiálu. Tímto průsečíkem povedeme rovnoběžku se svislou osou (Y). Ta protne křivku závislosti síla – deformace v určitém bodě, který je vynesena na osu Y. Získaná síla je označována „ F_e “. Se získanou silou je dále počítáno následovně [6]:



Obr. 4.4 Graf závislosti zátěžné síly (Y) na posuvu (X)

$$R_e = \frac{F_e}{h_0^2} \cdot \beta + C \quad (5)$$

β, C parametry přímky experimentálně stanovené

b) Stanovení hodnot R_m

V případě hodnot R_m můžeme využít základních rovnic (1, 2, 3, 4). Dalším používaným vztahem pro výpočet R_m je [6]:

$$R_m = \frac{F_m}{d_m \cdot h_0} \cdot \beta + C \quad (6)$$

β, C parametry přímky experimentálně stanovené

2) Stanovení hodnot J_{IC} a K_{IC}

Stanovení korelačních parametrů pro výpočet J_{IC} je možné několika způsoby. Veškeré korelace jsou prováděny na základě výsledků ze standardních zkoušek.

- a) Pro stanovení hodnot J_{IC} se vychází ze stejného vzorce (7), jak pro výpočet, tak pro měření efektivní lomové deformace ε_f .

$$J_{IC} = k\varepsilon_f + J_0 \quad (7)$$

J_{IC} lomová houževnatost

ε_f efektivní lomová deformace

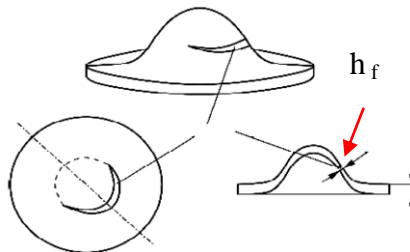
k, J_0 parametry přímky experimentálně stanovené

- Měření efektivní lomové deformace ε_f

V případě výpočetní metody efektivní lomové deformace (8) je třeba změřit nejužší místo (konečné tloušťky) v oblasti porušení, **Obr. 4.5**. Tato metoda je velice pracná a je potřeba speciálních technik.

$$\varepsilon_f = \ln\left(\frac{h_0}{h_f}\right) \quad (8)$$

h_f nejužší místo v oblasti porušení



Obr. 4.5 Měření místa v oblasti porušení h_f [6]

- Výpočet efektivní lomové deformace ε_f

Při stanovení efektivní lomové deformace výpočty (9), je potřeba vycházet i ze záznamu zkoušky SPT, **Obr. 4.3**. Je nutné znát hodnotu posuvu v místě porušení d^* . [6]

$$\varepsilon_f = \beta(d^* \cdot h_0)^x \quad (9)$$

d^* hodnota posuvu v místě porušení (lom)

β, x parametry experimentálně stanovené

b) Stanovení faktoru intenzity napětí K_{IC} . Před výpočtem lomové houževnatosti (10) je nutné nejprve zjistit hodnotu napětí σ_f^{SP} (11). [6]

$$K_{IC} = C(\sigma_f^{SP})^{2/3} \quad (10)$$

$$\sigma_f^{SP} = 130 \cdot \left(\frac{F_{MAX}}{h_0^2} \right) - 320 \quad (11)$$

σ_f^{SP} napětí pro vzorek SP [MPa]

F_{MAX} maximální zatížení [kN]

3) Stanovení koeficientu α pro určení přechodové teploty FATT

V případě stanovení korelačních vztahů přechodových teplot metodou SPT je důležité předem znát hodnoty FATT pro každý materiál. Stanovení přechodové teploty na základě jednoduchých vztahů je možné popsat následovně:

- Pro stanovení tranzitní teploty (12) je nutné provést zkoušky za teplot, při kterých materiál vykáže maximum (houževnatost) a minimum (křehkost) lomové energie. Jako minimum energie je brána hodnota 200 mJ (E_{MIN}) [8].
- Data se separují na dva oddíly **Obr. 4.6**.
- Každý z nich se proloží regresní křivkou. Vyhodnocení T_{SP} probíhá z křivky, která vykazuje se snižující se teplotou pokles hodnot energií (oddíl 2).
- Proveďte se výpočet (13). Z vypočtené střední energie E_{STR} je dále vedena vertikála, která protne v určitém bodě křivku energií. Vznikne bod, který odpovídá na ose X teplotě, která je právě tou hledanou přechodovou teplotou pro metodu SP (T_{SP}).

Jako parametr, který slouží k přepočtu mezi tranzitní teplotou SPT a přechodovou teplotou FATT, slouží parametr α (12). Ten se v mnoha publikacích uvádí v rozmezí 0,3 – 0,55 [10, 11, 12]. Při hodnotě E_{STR} je lomová plocha tvořena 50% podílem houževnatého lomu [10].

$$\alpha = \frac{T_{SP}}{FATT} \quad (12)$$

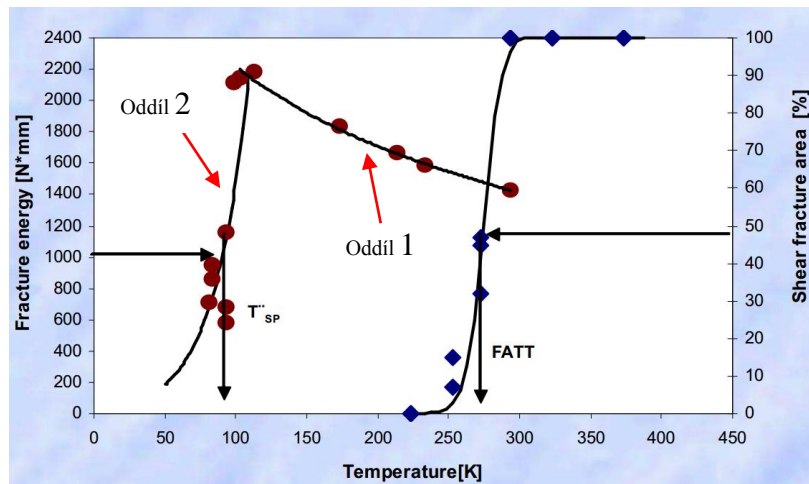
$$E_{STR} = \frac{E_{MAX} + E_{MIN}}{2} \quad (13)$$

E_{MAX}, E_{MIN} maximum a minimum energie [mJ] nebo také [Nmm]

T_{SP} tranzitní teplota SP [K]

α parametr stanoven experimentálně [-]

E_{STR} střední hodnota energie odpovídající teplotě T_{SP} [mJ]



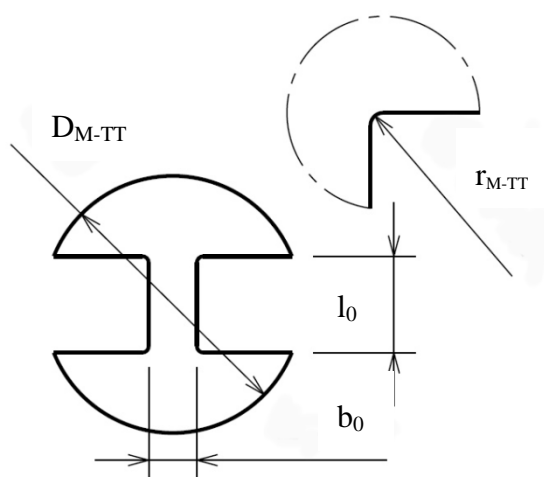
Obr. 4.6 Stanovení přechodové teploty metodou SPT [5]

4.2 Micro-Tensile Test

Ve své podstatě je metoda M-TT totožná s metodami standardních tahových zkoušek. Je zde snaha o miniaturizaci vzorků, přípravků a v neposlední řadě, je zde snaha o zjednodušení při vykonávání zkoušek a vyhodnocování. Metoda není, jak již bylo zmíněno, standardizována a neexistují v tomto směru prozatím žádné podklady. Snahou metody je však využívat normalizovaných postupů v poměru k velikostem vzorků.

Proces výroby vzorku

Výběr procesu výroby vzorků záleží na samotném charakteru odebíraného materiálu nebo na konstrukci, z níž je zkušební materiál odebírán. Jiné způsoby výroby se zvolí např. při odvrtávání, jiný při odběru z tenkostěnných trubek a jiný při odběru za použití odběrných zařízení. Jedno však mají všechny společné, jsou to rozměry tělíčka vzorku,



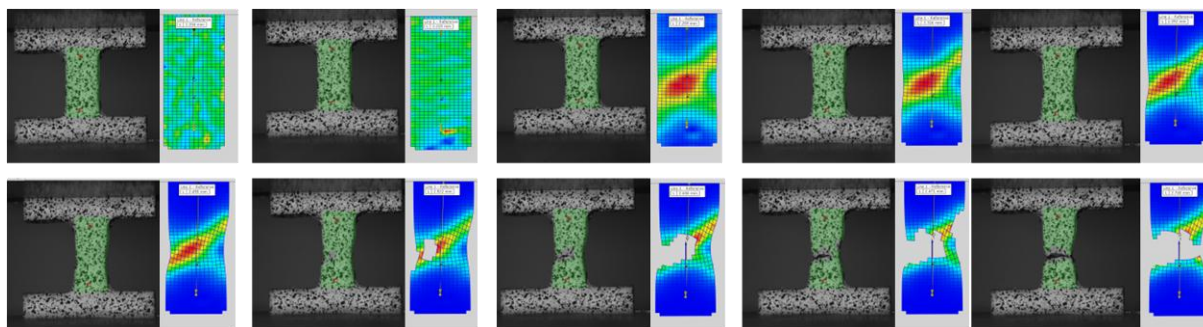
Obr. 4.7 Zkušební vzorek M-TT

Obr. 4.7. Rozměry jsou zachovány u všech typů zkoušených vzorků. Vnější rozměry (obrys) závisí na polotovaru, ze kterého se vzorky připravují. Při procesu výroby musíme dbát na to, aby nedošlo k deformaci a tepelnému ovlivnění zkušebnímu materiálu, respektive zkušebnímu vzorku.

Kontrolovanými rozměry vzorku jsou vnější průměr D_{M-TT} , šířka b_0 , tloušťka a_0 a zkušební délka vzorku l_0 . Přičemž rozměry l_0 a r_{M-TT} jsou dány geometrií nástroje, který byl pro výrobu drážky použit.

Měření rozměrů a deformace vzorku

V případě měření rozměrů je důležité použít citlivých měřících metod, a to z důvodů malých rozměrů vzorku. Tento citlivý způsob musí být dodržen i v případě měření deformací tak, aby neovlivňoval výsledky zkoušek (příklad měření deformací **Obr. 4.8**). Měření lze v obou případech provést mechanickými (kontaktními) či optickými (bezkontaktními) měřidly.



Obr. 4.8 Série snímků z průběhu zkoušky M-TT [6]

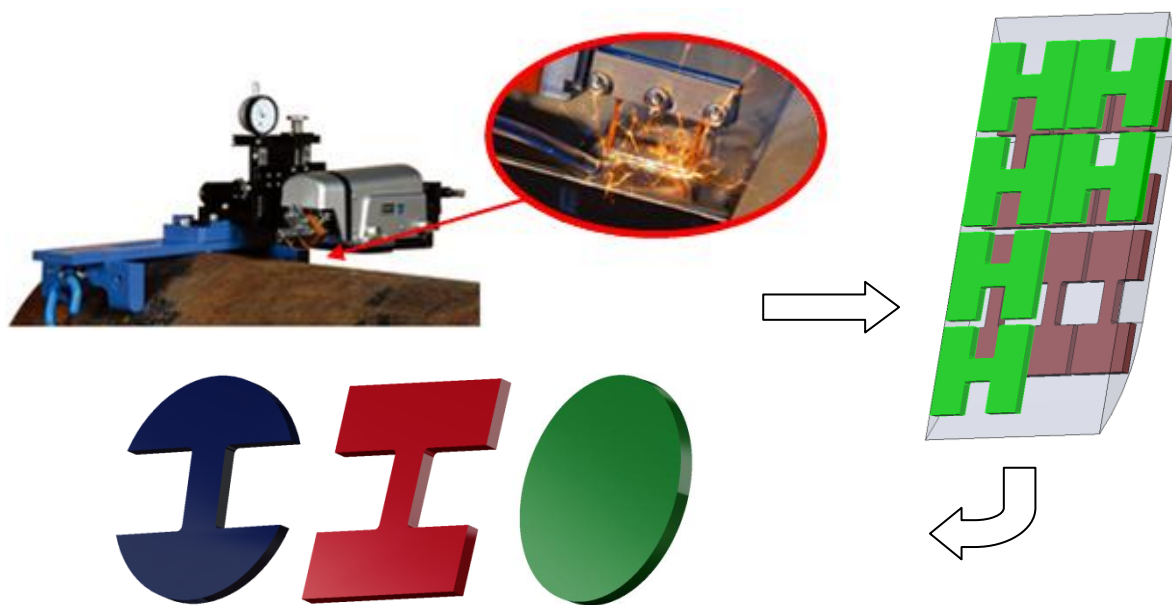
5. Speciální odběrová a měřicí zařízení

5.1 Odběrová zařízení

Nedílnou součástí problematiky miniaturních zkoušek, pokud odebíráme materiál z reálné funkční konstrukce, jsou odběrná zařízení. Tato zařízení nesmí narušit funkčnost konstrukce a nesmí ovlivnit materiál v oblastech odběrného místa. Tyto podmínky platí jak pro konstrukci, ze které byl materiál odebrán, tak i pro odebraný materiál. Při správném provedení odběru materiálu vzorku, splníme podmínky pro semi-destruktivní zkoušení. Z těchto důvodů je velice důležité vybrat správnou metodu odběru tak, aby nedošlo k poškození funkčnosti konstrukce. Odběrová zařízení jsou určena pro velmi specifické účely, a proto je na světě jen málo výrobců, od kterých je možné tato zařízení pořídit.

a) Metoda vyjiskřování - Electric Discharge Sampling Equipment (EDSE)

Zařízení bylo vyvinuto za účelem odběru malého objemu materiálu z velkých členů. To zahrnuje kupříkladu komponenty strojních zařízení. Odběr umožní získat dostatečné množství zkušebního materiálu pro miniaturizované zkoušky bez jakéhokoliv teplotního a deformačního ovlivnění. Takto odebraný materiál umožňuje zjistit skutečné mechanické vlastnosti materiálů a konstrukcí pro hodnocení zbytkové životnosti, degradace apod. Standardní velikost odebraného materiálu je 40x20x2,5 mm.



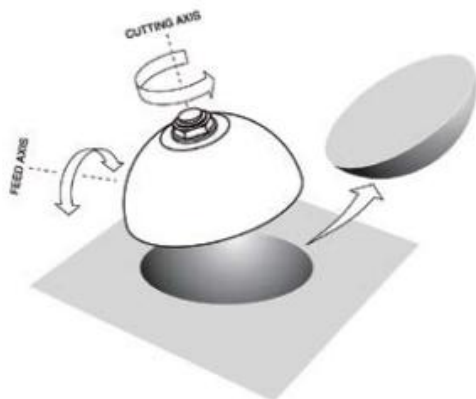
Obr. 5.1 Odběr zkušebního materiálu a možné geometrie zkušebních vzorků [11]

Vlastnosti vyjiskřovací metody:

- používá elektrického výboje k odběru materiálu
- odebírá materiál přímo ze zařízení (tloušťka vzorku 2,5 mm)
- zkrácení požadovaného času na odběr vzorku (běžný požadovaný čas 2 - 3 h)
- nevyžaduje velkou práci získat vzorek
- nízká pořizovací cena zařízení a obsluha
- odběr může být proveden na jakémkoliv místě bez jakéhokoliv vlivu na zařízení a součástky [11]

b) Metoda broušení - Scoop Sampling (SSamTM - 2) - Rolls-Royce

Použitím tenké frézovací polokoule o průměru 50 mm může SSamTM-2 odebrat malý kulový vrchlík zkušební materiálu, který je ve většině případů o průměru 25 mm a tloušťce 4 mm. Skutečný tvar a tloušťka vzorku bude záležet na geometrii součásti a hloubce řezu.



Povrch vyříznuté jamky na odebraném zařízení je zanechán s nízkým pnutím a vysokou kvalitou povrchu. Není třeba žádných oprav. Tento příznivý stav je výsledkem vysoké obvodové rychlosti, velmi malého posuvu a intenzivního chlazení, [12].

Obr. 5.2 Scoop Sampling [12]

5.2 Měřicí zařízení

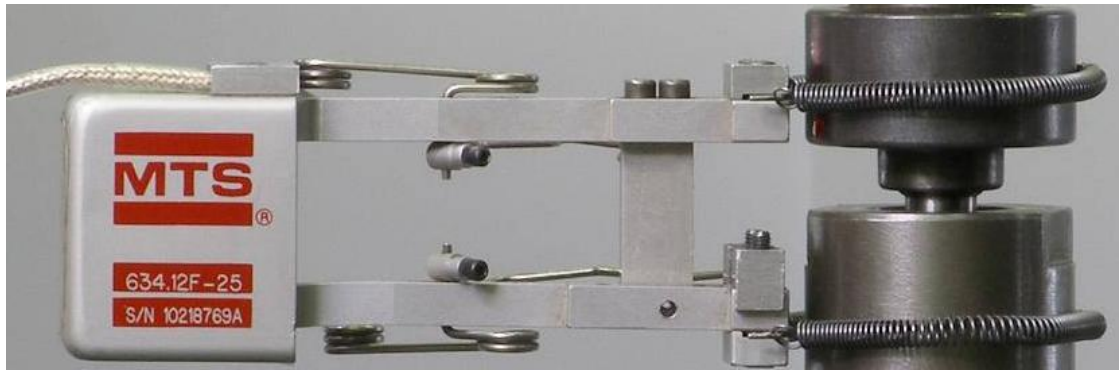
Obecně pro jakékoliv nestandardní metody testování je velice složité najít vhodná komerčně nabízená měřicí zařízení pro měření deformací. Miniaturní zkušební metody však vyžadují zařízení, která jsou citlivá a šetrná ve vztahu ke zkušebnímu vzorku. Z těchto důvodů probíhá měření deformací v drtivé většině bezkontaktně. V našem případě můžeme rozdělit měření deformací na kontaktní a bezkontaktní.

5.2.1 Kontaktní měřicí metody (mechanické)

Kontaktní metody měření délkových změn jsou nejčastěji používané měřicí techniky. Tyto snímače jsou ve své podstatě tenzometry, které jsou vhodně umístěné a orientované na průtahoměru tak, aby zaznamenávaly deformaci materiálu průtahoměru. Tyto deformace vyvolávají změny elektrického odporu při průchodu elektrického proudu tenzometrem a tím vyvolávají změnu výstupního napětí, které se dále zpracovává. Deformace tenzometrů v průtahoměru nesmí překročit povolenou mez, která je určena Hookovo zákonem. Z těchto důvodů jsou měřidla vyráběná s určitými rozsahy, které se nesmí překročit, jinak dojde k nevratnému poškození měřidla. Mezi výhody obecně patří přímý kontakt s testovacím vzorkem, snadná kalibrace, rychlost přípravy pro měření, rychlost upnutí, přesnost, jednoduché technické vybavení a úspora místa. Mezi nevýhody patří neuniverzálnost měřidel, která vychází z měřícího rozsahu a teplot, za kterých je měřidlo používáno

Průtahoměry

Tyto snímače se používají pro přímé měření deformace při zkouškách tahem, tlakem, ohybem či únavových s proměnlivým zatížením. Nabízí velký rozsah měření, který může být plynule nastaven v závislosti ke zkoušenému vzorku. Sponové snímače anebo průtahoměry s rameny jsou připnuty přímo na vzorek s nastavenou měřenou délkou. [13]



Obr. 5.3 Průtahoměr umístěný na přípravku pro SPT [6]

5.2.2 Bezkontaktní měřící metody (optické)

Pro tyto skupiny měřících zařízení je typické, že neměří přímo délku, ale pouze veličinu, ze které se tato délka určí. Tento fakt znamená, že při každém provedení měření deformací, bude potřeba zařízení správně nekalibrovat. K tomuto účelu slouží kalibrační měřidla.

Charakteristickou vlastností těchto metod je univerzální počáteční vzdálenost měřidla a v drtivé většině také možnost vyhodnocovat deformace ze záznamu zkoušky v tzv. post-processingu. Takto je tedy možné měřit vzorky o velikostech od několika jednotek až po několik stovek mm a to nejen v průběhu testu. Mezi nevýhody měřidel patří skutečnost, že pracují s optickými jevy a jsou náchylné na jakoukoliv změnu světelných podmínek. Z těchto důvodů je v drtivé většině nutné upravit povrch testovaného vzorku (odrazivost) a v průběhu zaznamenávání dat zajistit stejné světelné podmínky.

a) Videoextensometer

U běžných mechanických průtahoměrů je důležité, aby hroty průtahoměru vždy před samotným měřením byly nastaveny na počáteční měřenou délku l_0 , na kterou jsou kalibrovány. Tyto snímače jsou pak následně deformovány a tato deformace je převedena na signál. Tento proces může vést k chybám. Videoextensometer oproti tomu funguje přímo jako „Strain meter“, tedy nepřetržitě měří vzdálenost mezi dvěma body a přímo vypočítává deformaci z počáteční měřené délky a změny vzdálenosti mezi měřenými body. Umožňuje měření podélné i příčné deformace. Poměrná deformace se vypočte (14):

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (14)$$

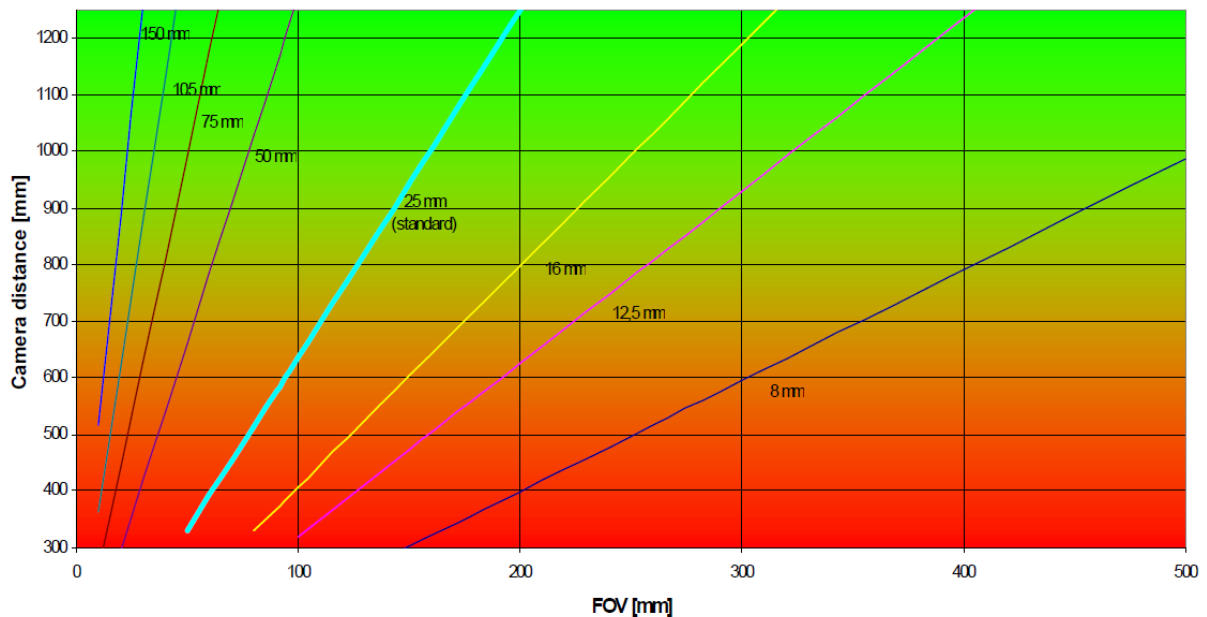
ε poměrné prodloužení [-]

Δl změna délky [mm]

l_0 počáteční měřená délka [mm]

Kalibrace se provádí před samotným měřením tak, že v průběhu testu a následně po kalibraci, nesmí dojít ke změně vzdálenosti mezi měřeným objektem a kamerou. Tento pohyb by totiž znamenal změnu vzdálenosti mezi kamerou a vzorkem a změnilo by se tak zorné pole viz **Obr. 5.4** Šířka čipu kamery je 4,8 mm (1/3 palce). Software by tento krok vyhodnotil chybně

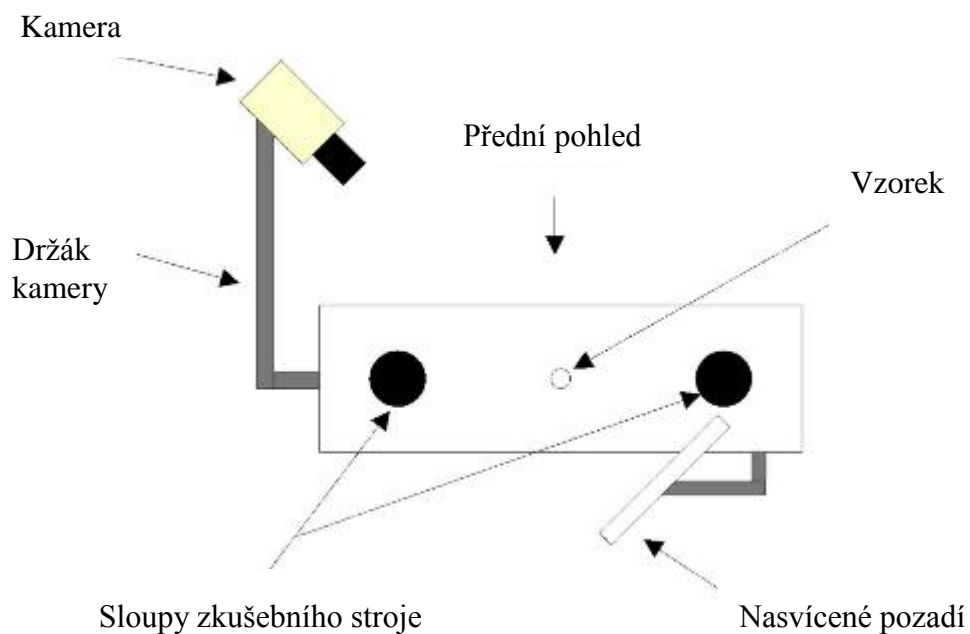
jako prodloužení nebo zkrácení zkušební vzorku. Pokud je kamera připevněna přímo na rámu zkušebního stroje, k tomuto problému by nemělo dojít. [16]



Obr. 5.4 Závislost vzdálenosti kamery od vzorku a velikosti zorného pole [16]

Hardware

Černobílá kamera - je osazena přesným CCD (Charge Coupled Device) čipem jenž je složen z mnoha fotocitlivých buněk, které jsou uspořádané do přesné lineární sítě. Umístění kamery vůči vzorku viz **Obr. 5.5**.



Obr. 5.5 Schéma rozmístění kamery systému Videoextensometer [16]

Princip

Ve většině případů probíhá měření deformací pomocí funkce „pattern“. Zde je prvně analogový signál převeden do digitální podoby. Speciální hardware převádí analogový signál do dvojdimenzionální matice o rozměru 756x566 pixelů. Přičemž každému pixelu odpovídá odstín šedi v hodnotě od 0 do 255. Matematicky jde o diskrétní dvojdimenzionální funkci „f“ (x,y). Přičemž je snímán pouze vybraný region, který poskytuje dostatek dat pro měření. Jako základ výpočtů tvoří dvojdimenzionální fourierovi transformace.

Jak již bylo zmíněno, černobílá kamera pořizuje snímky v digitalizované podobě ve stupních šedi od 0 do 255 (každý pixel) a každý z těchto snímků je následně uložen do počítače. To může působit potíže vzhledem k velkému množství dat (přibližně 11 MB snímek). Proto je nutné správně a efektivně zpracovat data tak, aby byla zachována dynamika odezvy. Tímto je umožněno použít Videoextensometer pro běžné kvazistatické zkoušky. V průběhu zkoušky je možné zaznamenávat a sledovat pohyb cílových bodů. Tyto sledované body totiž vytvářejí ostré přechody na stupnici šedi, a to podél skenované linie. Tyto rozdíly šedi vytvářejí vrcholky, které jsou vybrány jako měřicí body. Tyto referenční body jsou zobrazovány ve vybraných oblastech a operátor je schopný ručně zvolit alternativu v případech, kdy software tyto body chybně vyhodnotí. Pouze tyto body v těchto vybraných oblastech jsou nadále zpracovávány.

Cílové body jsou vybrány tam, kde kontrastní linie prochází přes hlavní hodnotu maxima a minima na stupnici šedi. Tato hodnota je dynamicky přizpůsobena během procesu testování a kompenzuje se, pokud kontrastní body slábnou vzhledem k protahujícímu se vzorku. Když je vybráno několik skenovacích řádků, tak pro každý z nich se vypočte cílový přechodový bod a z nich se získá střední hodnota. Použitím střední hodnoty pro měření deformace se zlepší přesnost, rozlišení a stabilita obrazu (lze získat mnohem lepší rozlišení), [16].

Data ve vyrovnávací paměti mohou být dále skenovány vertikálně. Platí pro něj stejné podmínky jako v případě horizontálního skenování. To poskytne možnost měření šířky vzorku. Data výsledné délky a šířky jsou dále přenášena přímo do testovacího stroje nebo jsou převedeny do externího počítače, kde jsou přímo ukládány na pevný disk.

Pokud se všechny zvolené měřicí procesy uložily v rámci jednoho naskenovaného snímku, je skenován další snímek. Vyrovnávací paměť se obnoví a měření se opakuje. Čas mezi jednotlivými cykly závisí nejen na rychlosti počítače, karty, ale také na množství dat, které mají být zpracovány. [16]

Podle velikosti zorného pole, je možné získat rozlišení od 0,3 μm až 6 μm , viz **Tab. 5-1**.

Tab. 5-1 Rozlišovací schopnost závislá na velikosti zorného pole [16]

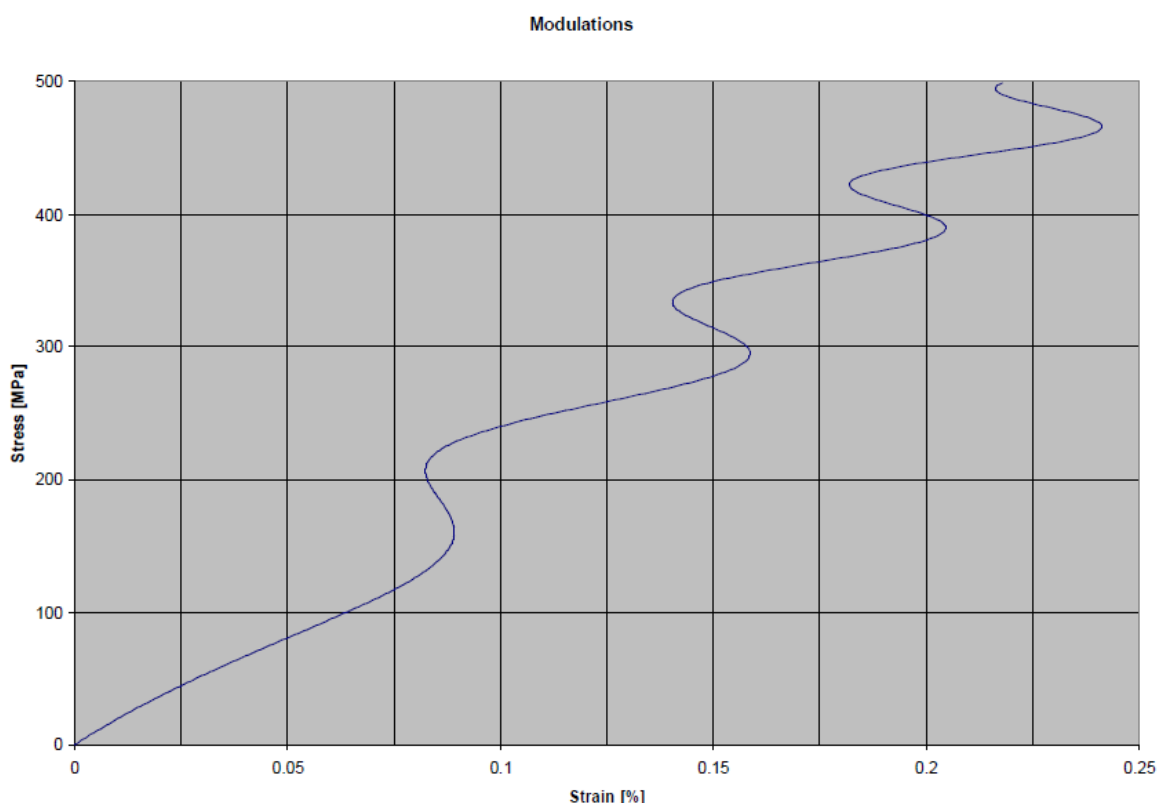
Šířka zorného pole [mm]	Minimální rozlišení [μm]
50	< 0,3
250	< 1,5
500	< 3
1000	< 6

Linearitu a reprodukovatelnost měření je možné ověřit pomocí kalibrační soupravy.

Ovlivňující činitele

Navzdory eliminaci všech provozních chyb mají jisté změny, vliv okolních podmínek, během testu vliv na integritu výsledků. Ty nemohou být softwarem vždy a zcela automaticky kompenzovány. Do těchto kategorií patří:

- osvětlení – změna úrovně kontrastu v okolí měřených bodů (kolísání světla)
- měřené body – změna tvaru, barvy a umístění během testu, nerovný povrch, kolmo umístěné značky vedou k modulaci viz **Obr. 5.6**
- ostatní – úhlové posunutí kamery [16]



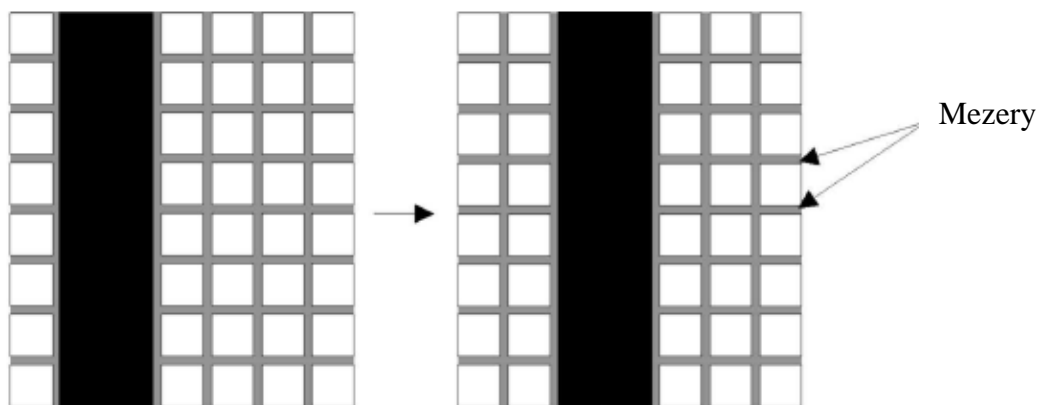
Obr. 5.6 Modulace v důsledku špatně připravených značek (kolmost značek vůči hlavní ose napětí) [16]

Modulace způsobuje zejména při nízkých úrovních deformace zkreslení výsledků. To je způsobeno tím, že značky jsou vytvořeny v pravém úhlu vůči ose měření.

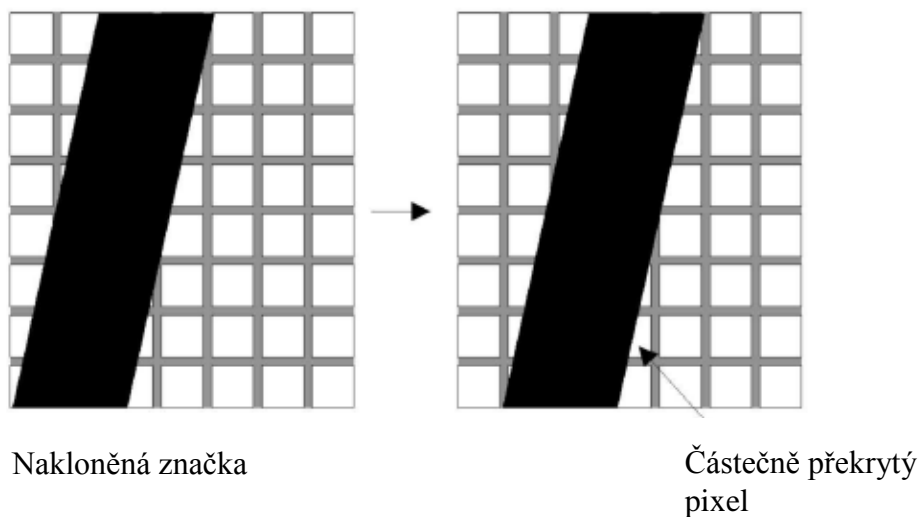
CCD kamera se totiž skládá z lineární matice na světlo citlivých bodů (pixelů), které jsou odděleny od svých sousedů malou mezerou. Pokud tedy kontrast, který vytvářejí značky, projde z jednoho do druhého pixelu, tak přejde přes mezeru, což způsobí mírné rušení při výpočtech na této pozici.

V případě, že jsou značky v pravém úhlu vůči měřené ose, vedou kontrastní body v každé měřené linii současně přes mezery a způsobují vlny – modulaci.

To lze kompenzovat či odstranit nakloněním značek vůči měřené ose o 2 až 5° viz **Obr. 5.7**. [16]



Kolmá značka



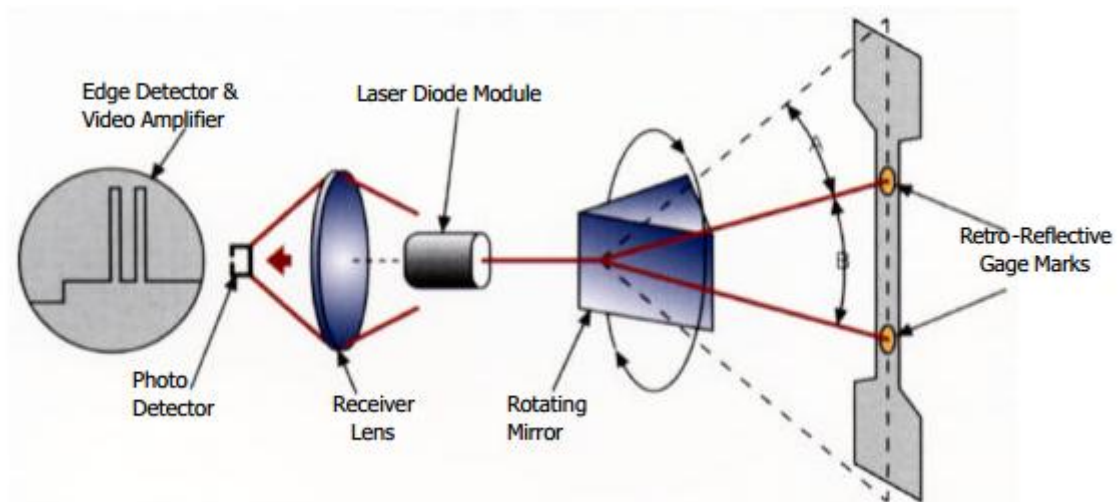
Nakloněná značka

Částečně překrytý pixel

Obr. 5.7 Umístění značek vůči matici CCD kamery [16]

b) Lasery

Laserné průtahoměry umožňují plynulé bezkontaktní měření deformace vzorku od počátku testu až do poškození vzorku. Jsou navrženy tak, aby poskytovaly přesné rozlišení, které umožňuje zaznamenat hodnoty prodloužení menší než 1 % až do 1000 %. Tyto rozsahy prodloužení naznačují univerzálnost použití, co se velikostí měřených oblastí týče. Tento fakt je velmi důležitý pro aplikaci na metodu jako je M-TT. Tento systém je vhodný pro zkušební podmínky za pokojových, snížených i zvýšených teplot. Velký rozsah použití zahrnuje celou řadu možných využití. Nejčastěji se využívá pro měření podélných i příčných deformací kompozitů s vysokým modulem pružnosti, keramik, feritických či neferitických materiálů, papíru, dřeva a elastomerů.



Obr. 5.8 Schéma principu měření deformací laserem [17]

Princip

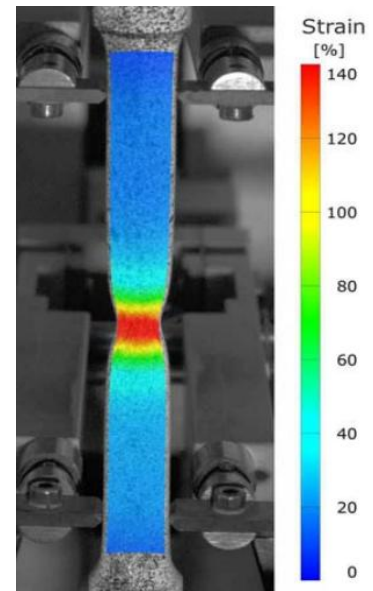
Viditelný svazek světla o nízké intenzitě je vysílán do rotujícího zrcadla tak, že svazek se zobrazí jen podél osy testovaného vzorku. Pár odrazivých měřících terčíků umístěných na vzorku vrátí tento svazek zpět do rotujícího zrcadla a dále pak do přijímače (Existují také lasery, které umožňují měření deformací bez použití terčíků.). Počítačový měřicí systém zkontroluje dobu mezi terčíky a průběžně vypočítává tuto proměnnou vzdálenost pomocí trigonometrie viz **Obr. 5.8.** [17]

c) Digital Image Correlation (DIC)

Tento komplexní systém se řadí mezi bezkontaktní optická metoda typu DIC (Digital Image Correlation) a umožňuje sub-pixelově přesné zpracování obrazu 3D povrchů, měření posuvu a deformace. Systém vyhodnocuje snímky s vysokým rozlišením, které byly pořízeny a uloženy během provedení testu. To vše za pomoci precizní matematické kalibrace, která zahrnuje polohu kamery a zkruslení čoček.

Zpracování obrazu je založeno na principu digitální obrazové korelace. Rozdělení hodnot šedé je počítáno pro velké množství malých podskupin v každé z kamer a poskytuje sub-pixelově přesnou pozici, která odpovídá bodům mezi všemi snímky.

Matematický model nastavení snímačů, digitální obrazová korelační metoda a triangulační výpočty jsou kombinovány pro odvození velmi přesných 3D souřadnic. Odečtením informací o povrchu ve všech fázích nahrávání v 3D prostoru poskytuje přesné X, Y a Z hodnoty posuvu. Deformace jsou vypočteny s ohledem na geometrii součásti a teorie plasticity (ukázka průběhu deformace ve zkušební vzorku viz **Obr. 5.9**).



Systém poskytuje výsledky měření jako:

- přesnou 3D polohu, posuv a napětí pro jemné 3D zasít'ování
- rovinný tenzor deformace
- kontury předmětu na základě vizualizace

Obr. 5.9 Průběh deformace, ARAMIS [18]

Jedním z měřících zařízení založených na DIC je ARAMIS od GOM (**Obr. 5.10**).

ARAMIS je vhodné zařízení pro měření za vysokých teplot, pro vysoké testovací rychlosti a malé velikosti vzorků. Pomocí tohoto systému je možné získat:

- vyhodnocení napětí-deformace
- modul pružnosti
- modul pružnosti ve smyku
- Poissonovo číslo
- limitní křivky tváření
- zbytková napětí [18]



Obr. 5.10 Hardwarové vybavení systému ARAMIS [18]

Příprava povrchu měřeného objektu

Požadavky na přípravu povrchu měřeného objektu jsou v zásadě dva:

- použitý vzor se nesmí opakovat,
- vysoký kontrast vzoru.

Požadavky na vzor musí být nezávislé na směru, tedy v každém směru musí vykazovat stejné vlastnosti.

System vyhodnocuje pouze přechody mezi vzorem a pozadím. Nezáleží tedy na tom, jestli bude vzor tmavý a pozadí světlé, nebo naopak. Důležité však je, aby velikost vzoru byla pro dané měření optimální. Vzor nesmí být příliš velký, ani malý vůči měřené oblasti.

6. Úvod do experimentu

Jak již bylo zmíněno v úvodu práce. Důvodů pro použití nestandardních zkušebních metod je několik, avšak nejvýraznějším z nich je úspora nákladů provozovatelům energetických zařízení v případech hodnocení zbytkové životnosti.

Odhadů zbytkové životnosti lze užít u výrobků a konstrukcí, kde končí či skončila konstruktéry navrhovaná životnost. Zde se provozovatelé ptají, zda po uplynutí této doby budou nutná provozní omezení či nikoliv. Odpověď nám může poskytnout metoda Small Punch Test. Jejíž pomocí lze získat tolik potřebné materiálové informace a ušetřit tím provozovatelům nemalé finanční prostředky (odstávka, generální opravy). Informace o současném stavu materiálu nám poskytnou podklady k tomu, zda došlo vlivem provozních podmínek k degradaci materiálu do takové míry, že je konstrukce na konci své životnosti (mezní stav) či nikoliv. Mechanické hodnoty jsou získány nepřímou, a to přepočtem korelačních vztahů získaných porovnáním se standardními metodami. Zkoumáme lineární závislost mezi standardními a nestandardními metodami pro konkrétní materiál. Nutnost korelací se standardními metodami (tahová zkouška, vrubová a lomová houževnatost) se řadí mezi obecné nevýhody metody, protože výsledné korelační vztahy platí pouze pro úzké pole materiálů.

Pro stanovení mechanických vlastností konstrukčních materiálů lze však uplatnit nejen metodu Small Punch Test, ale i Micro-Tensile Test. M-TT je metoda vycházející z vnějších rozměrů vzorku pro SPT. Proto by měl být objem odebraného materiálu v obou případech shodný (ne však objem zkušební vzorku). Z tohoto důvodu lze i zde hovořit o úspoře materiálu a lze použít přinejmenším stejných technik odběru jako v případě SPT. Zde však podobnost obou metod končí. Metoda M-TT je čistě tahovou zkouškou, kde požadujeme závislost napětí na deformaci. V praktické části práce je cílem zjistit, zda je metoda M-TT vhodnou alternativou standardní tahové zkoušky či jí lze uplatnit pouze jako metodu doplňkovou.

Poněvadž není ani jedna z metod standardizována a neplatí pro ně žádné závazné postupy, bylo nutné stanovit geometrii vzorků, za jakých podmínek proběhne testování a následné vyhodnocování testu. Pro metodu SPT byl použit doporučený pracovní postup (CoP) a pro M-TT bylo vše upraveno tak, aby se zkouška co nejvíce přiblížila k podmínkám pro standardní tahové zkoušky dle ČSN EN ISO 6892-1.

7. Výběr materiálu

Při prvotních porovnání zkušebních metod využívajících miniaturní vzorky se standardními metodami, bylo použito materiálů, které vykazují malé procento vad a vad, které nenabývají kritických velikostí. Velikost vad nesmí zásadně ovlivňovat výsledky měření. Důležité také je, aby materiál, v ideálním případě vykazoval totožné mechanické vlastnosti v celém jeho objemu. Toho stavu lze však dosáhnout velmi obtížně, proto pro prvotní porovnání je nutné užít materiály a směry odběrů, které si budou co možná nejvíce odpovídat (reprodukovatelnost) mezi porovnávanými metodami. Proto tato měření začínají s materiály takřka laboratorními a dále se aplikují na materiály z běžné praxe, tedy na materiály reálných konstrukcí.

V rámci práce je počítáno pouze s materiály kovovými. Feritické oceli byly použity z důvodů stanovení přechodových teplot T_{SP} (tranzitní chování).

7.1 Laboratorní materiál

Byla použita ocel 34CrNiMo6 (ČSN 16 343) ve 4 různých stavech tepelného zpracování pro prvotní porovnání mezi metodami SPT, M-TT a STT. Tento materiál byl také použit při hodnocení přechodových teplot T_{SP} (Ocel 1 a 2). Z takto tepelně zpracovaného materiálu byly vyrobeny desítky zkušebních vzorků.

Tepelné zpracování (vyjma stavu A, základní materiál):

- austenitizace na teplotě 860 °C s dobou výdrže 15 minut,
- kalení do vody z austenitizační teploty,
- dvouhodinové popouštění při teplotách viz **Tab. 7-1**.

Tab. 7-1 Tepelné zpracování oceli 16 343

Stav	$T_{\text{austenitizace}} [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{popouštění}} [^{\circ}\text{C}]$
A	-	-
B	860	680
C	860	750
D	860	450

7.2 Materiál reálné konstrukce

Jak již bylo zmíněno v úvodu. Největší využití nestandardních metod je v energetickém průmyslu. Proto bylo použito konstrukce, která se přímo týká tohoto odvětví. Byl vybrán rotor parní turbíny, který byl svařen ze dvou kusů ocelí tříd 16. Z důvodů zachování obchodního tajemství, není možné uvést přesná označení ocelí a svarového kovu. Proto byla použita označení (pro obě ocelové části rotoru) ZM1 a ZM2. Odběrnými místy byly:

- ZM1 a ZM2
- Svarový kov

8. Výběr experimentálních metod

Experimentální část práce se zabývá těmito metodami:

- Small Punch Test - FATT, materiály vykazující tranzitní chování
 - J_{IC} , houževnaté materiály
 - K_{IC} , křehké materiály
- Micro-Tensile Test

Srovnání probíhají vždy se standardními metodami, a to pro všechny typy materiálů viz experimentální materiál (kapitola č. 7). Srovnání se týká oceli 16 343 ve 4 stavech TZ a částečně svařence z oceli tříd 16. Zde probíhalo srovnání číselně i graficky, a to kvůli ověření naměřených mechanických hodnot.

Mezi vybrané metody měření podélných deformací patří:

- mechanické (kontaktní) - průtahoměr
- optické (bezkontaktní) - Videoextensometer

8.1 Provedení zkoušek Small Punch Test

Zkoušky byly provedeny za konstantních podmínek na zkušebním servo-hydraulickém zařízení Si-Plan o kapacitě 10 kN. Stejnými podmínkami se rozumí rychlost deformace, respektive rychlost posuvu pístu, která je udávána v CoP v rozmezí od 0,2 do 2 mm/min. Odchyly teplot od nominální teploty v průběhu jednotlivých měření nepřesáhly ± 3 °C **Obr. 8.5**.

8.1.1 Stanovení přechodové teploty T_{SP}

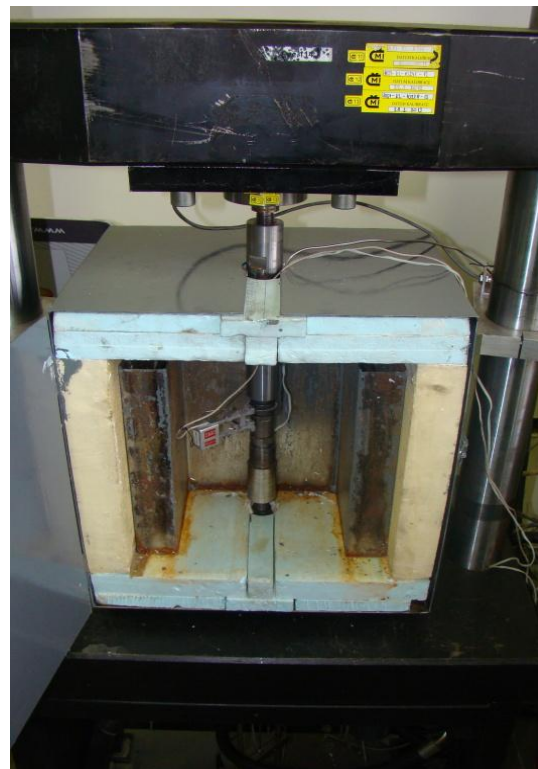
Zkoušky jsou rozděleny dle teplot na zkoušky za teploty:

- Pokožové (23°C) a
- Snížené (od 20 °C do -196 °C).

Měření za snížených teplot probíhala v kryogenním boxu **Obr. 8.1** a **Obr. 8.2**. Byla provedena měření teploty vzorku, přípravku a okolí v kryogenním boxu, **Obr. 8.3**. Zatímco teplota vzorku následovala velmi rychle teplotu zkušebního vzorku v řádech desítek sekund, teplota přípravku a okolí se lišila v řádech desítek stupňů a vyrovnání teplot nenastalo ani po 2 hodinách. Nicméně bylo možné dosáhnout požadované zkušební teploty v rozsahu +26 °C až -130 °C pomocí kryogenní komory dle **Obr. 8.1** a **Obr. 8.2**.

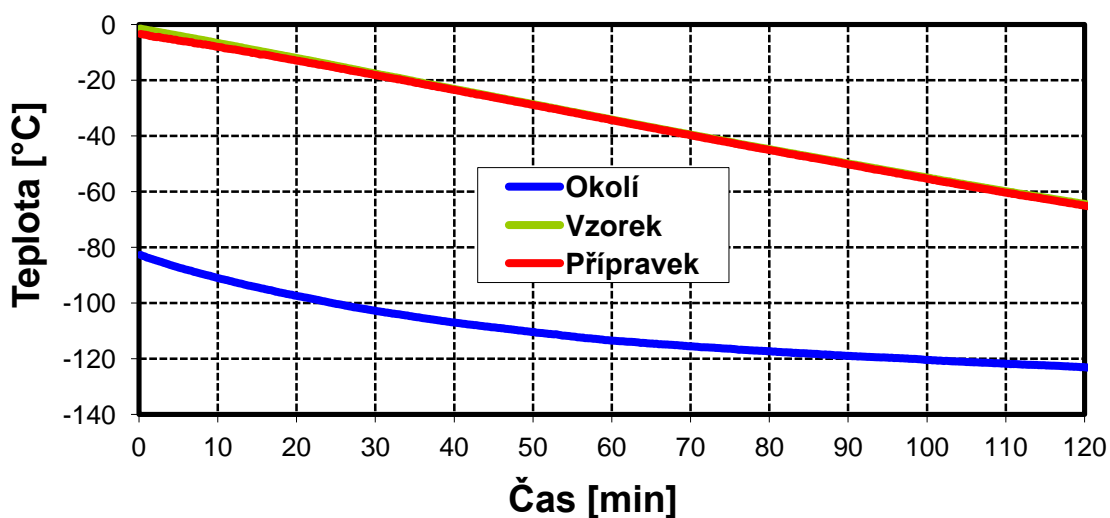


Obr. 8.1 Kryogenní komora do $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$



Obr. 8.2 Umístění komory na zkušebním zařízení

Pro teploty nižší než $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$ byl zvolen přímý kontakt mezi přípravkem a chladícím médiem, **Obr. 8.4.** Teplota chladicí lázně je v tomto případě upravena poměrem dusíku a metylalkoholu tak, že při $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ byl v lázni pouze čistý kapalný dusík. Izolace mezi zkušebním přípravkem a táhly zkušebního zařízení zajišťují minimální přestup tepla, a tak snižují potřebnou dobu pro vyrovnání teplot (malý objem ochlazovaného materiálu) a spotřebu dusíku.



Obr. 8.3 Průběh vyrovnávacích teplot pro kryogenní pec

Zkoušky pro stanovení přechodové teploty SP (T_{SP}) probíhaly u ocelí s označením „Ocel 1“ za teplot 0, -20, -40, -60, -80, -100, -120, -140, 160 a -196 °C a „Ocel 2“ za teplot 20, -100, -110, -130, -155, -170 a -196 °C. Zdánlivě náhodně zvolené kryogenní teploty pro „Ocel 2“, byly zvoleny z předchozí zkušenosti (Ocel 1) tak, aby zkoušky co nejvíce pokryly přechodovou oblast. Dochází zde ke zlomu ve vlastnostech materiálu (snížení energetické náročnosti pro vytvoření trhliny).



Obr. 8.4 Umístění přípravku přímo v lázni



Obr. 8.5 Měření teploty během testu, +3 °C

Stanovení lomové energie

Výpočet lomové energie vychází ze závislosti síla-deformace Obr. 8.6. Hodnotu lomové energie, respektive plochy pod křivkou (žlutá barva), získáme integrací součinu síly a posuvu razníku (15) v mezích od 0 do lomu (d^*). K lomu dojde tehdy, objeví-li se na záznamu síla-deformace pokles o 20 % (16) vůči maximální síle F_m , nebo objeví-li se na povrchu vzorku první necelistvost (pozorování pouhým okem). [4]

$$E^{SP} = \int_{x_1}^{x_2} F(x)dx \quad (15)$$

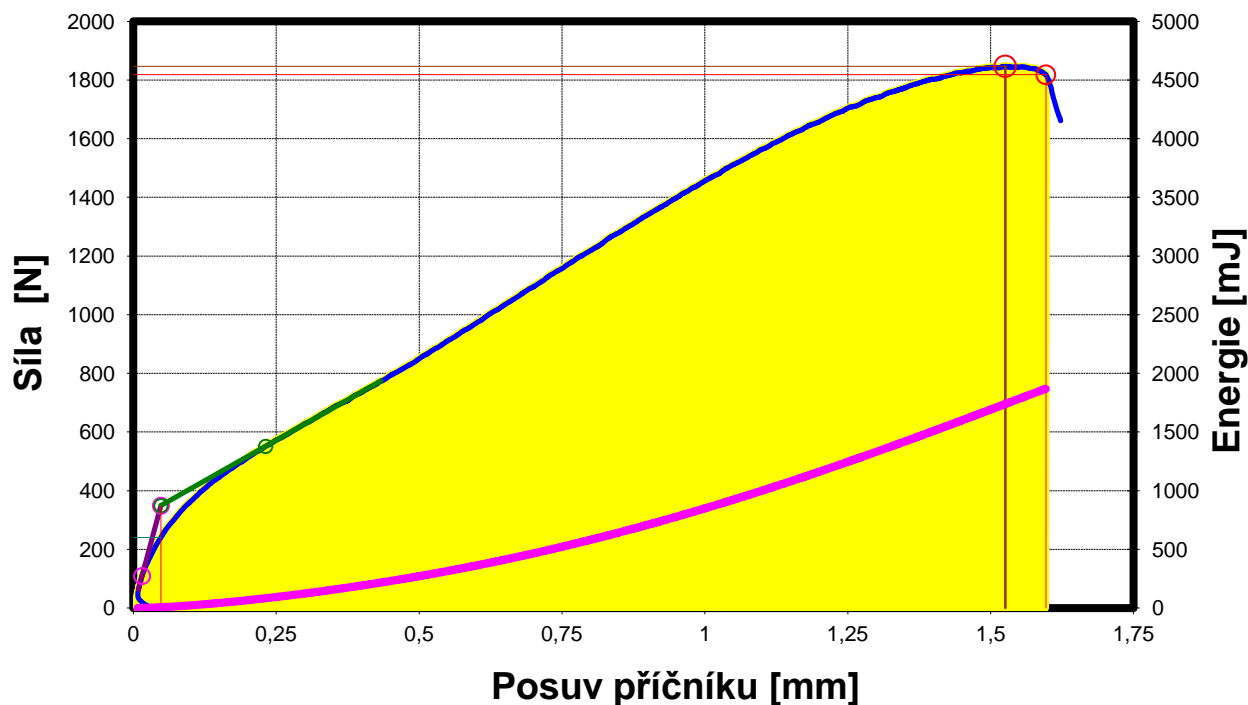
$$F^* = 0,8 F_m \quad (16)$$

E^{SP} lomová energie [mJ]

F síla [N]

x deformace, pohyb příčnicku [mm]

Vyhodnocování probíhalo za pomoci softwaru Microsoft Excel.



Obr. 8.6 Stanovení lomové energie pro metodu SPT, výpočet plochy pod křivkou

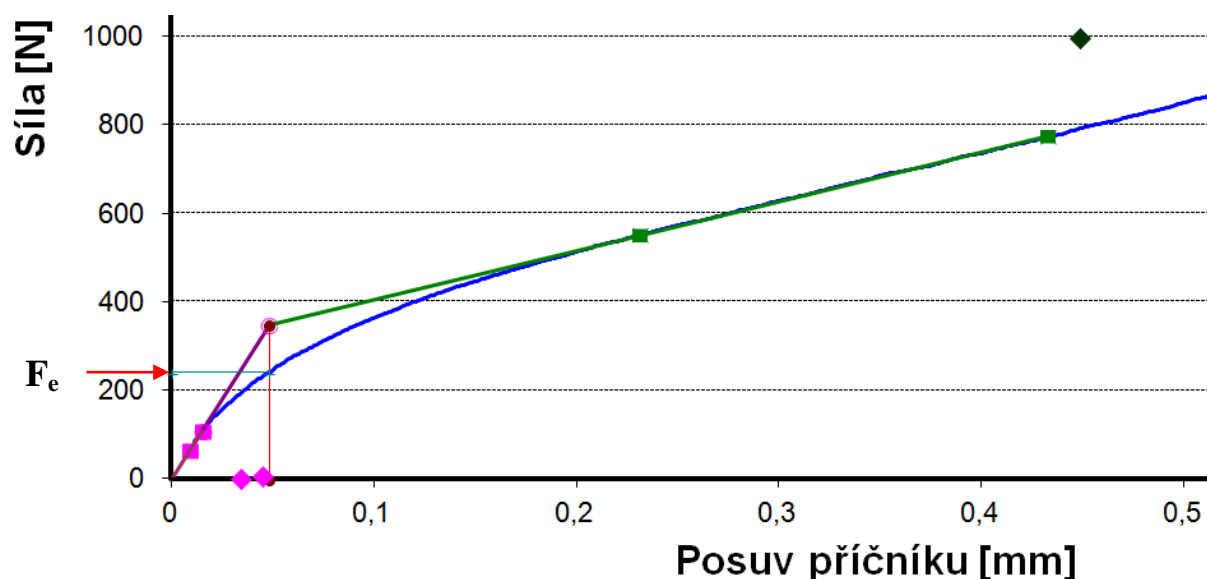
V podstatě pro vyhodnocení lomové energie postačil záznam průběhu síly (siloměr) a posuvu razníku (průtahoměr). Zjištěná celková hodnota energie v mili-joulech [mJ] příslušnou teplotou (pro každý vzorek), byla vynesena do grafu závislosti energie-teplota. Z takto získaných bodů, v rozmezí teplot od 0 do $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, byly sestrojeny dvě řady dat (**Obr. 4.6**). Pro vyhodnocení přechodové teploty je zajímavá pouze ta řada dat, kde dochází vlivem snižování teploty k poklesu lomové energie v intervalu z MAX do MIN. Přechodová teplota T_{SP} je tak v podstatě teplota na ose X, které odpovídá průsečík aritmetického průměru minimální a maximální hodnoty energie se spojnicí klesajícího trendu, viz vztah (13).

8.1.2 Stanovení meze kluzu

Existuje mnoho způsobů stanovení meze kluzu $R_{e(cal)}$, respektive hodnot F_e , ze závislosti síla-deformace. Přičemž se výsledky liší jen minimálně (povaha materiálu). Aby bylo možné vypočítat $R_{e(cal)}$ pro SPT, je potřeba znát původní tloušťku vzorku h_0 a sílu F_e . Ta odpovídá průsečíku svislice (jejíž poloha na ose X je určena průsečíkem dvou lineárních regresí) s křivkou síla – deformace, **Obr. 8.7**. Z takto stanovené síly a původní tloušťky vzorku, již lze vypočítat napětí $R_{e(cal)}$, které je nadále korelováno s výsledky ze standardní tahové zkoušky. Korelací jsou získány dosud neznámé parametry přímky β a C , pomocí kterých lze zpětně vypočítat hodnoty meze kluzu pro STT.

$$R_{e(cal)} = \frac{F_e}{h_0^2} \quad (17)$$

$R_{e(cal)}$ mez kluzu stanovená metodou SPT [MPa]



Obr. 8.7 Vyhodnocení síly F_e ze závislosti síla – posuv příčnicku

8.1.3 Stanovení meze pevnosti

V porovnání s mezí kluzu $R_{e(cal)}$, kde lze zvolit mnoho postupů pro stanovení síly F_e , je možné použít v případě výpočtů meze pevnosti pouze jedné cesty (18). Je zde počítáno s maximální silou F_m , posuvem příčnicku d_m v místě maximální síly a původní tloušťkou vzorku h_0 . Hodnoty F_m a d_m jsou přímo odečteny z grafu, viz **Obr. 4.3**. Takto získané hodnoty $R_{m(cal)}$ jsou dále korelovány s výsledky meze pevnosti ze standardní tahové zkoušky tak jako v případě stanovení meze kluzu. I zde platí, že korelaci se standardní metodou lze stanovit doposud neznámé parametry přímky β a C , které nám umožní přepočítání mezi oběma metodami.

$$R_{m(cal)} = \frac{F_m}{h_0 \cdot d_m} \quad (18)$$

$R_{m(cal)}$ mez pevnosti stanovená metodou SPT [MPa]

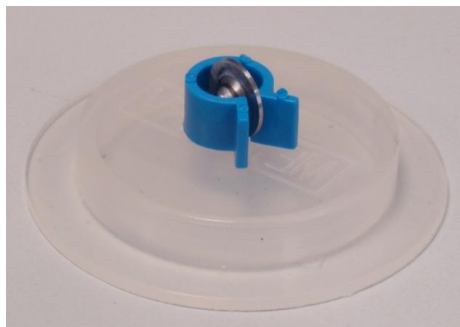
8.1.4 Stanovení parametrů lomové houževnatosti J_{IC}

Podstatou je stanovení efektivní lomové deformace ε_f , kterou lze získat mnoha způsoby.

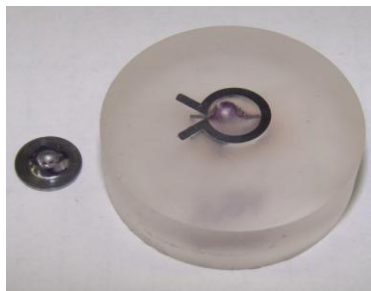
- V případě přímého měření tloušťky nejužšího místa iniciace trhliny h_f byly veškeré vzorky důkladně změřeny (průměr, tloušťka), nastaveny do vhodné pozice a zality do dentakrylu. Tato metoda je velmi pracná a časově náročná.

Postup přípravy pro měření

Vzorek se umístí na dno zalévací formy a nastaví se do polohy pomocí plastového kroužku (**Obr. 8.8**) tak, aby vzdálenost mezi dnem formy a místem iniciace lomu vzorku, byla přesně $D/2$. Po ztuhnutí hmoty se změří její tloušťka a ubrousí se o hodnotu $D/2$ (**Obr. 8.9**). Tímto je docíleno správného nastavení pro měření konečné tloušťky vzorku (iniciace trhliny) na metalografickém mikroskopu.

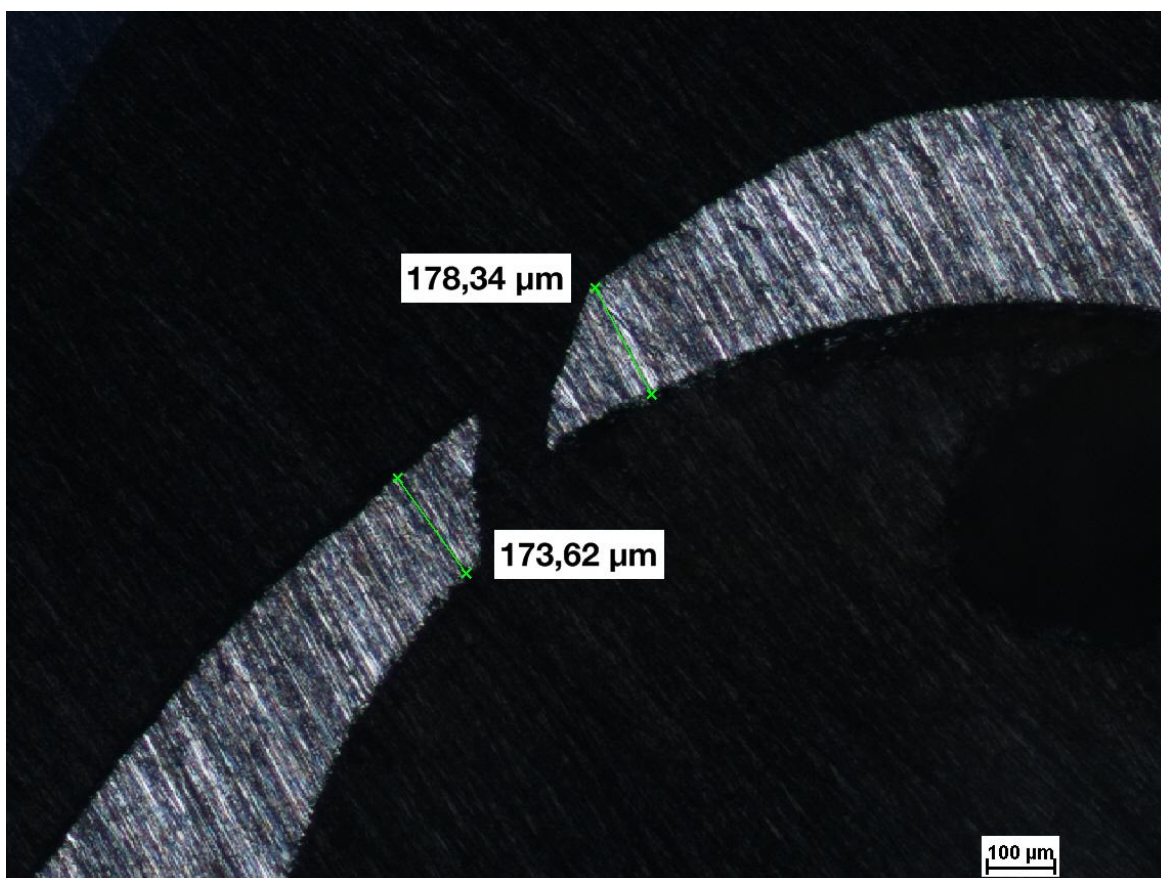


Obr. 8.8 Umístění SP vzorku před zalitím do Dentakrylu



Obr. 8.9 Vybroušený vzorek je připraven pro měření h_f

Měření nejužšího místa (**Obr. 8.10**) porušeného vzorku v místě iniciace trhliny probíhalo na světelném mikroskopu Nikon Epiphot 200.



Obr. 8.10 Měření nejužšího místa h_f

- b) Stanovení efektivní lomové deformace ε_f bez nutnosti měření konečné tloušťky vzorku bylo provedeno doporučeným způsobem. Pro výpočet ε_f je nutné znát původní tloušťku h_0 a posuv příčnicku v místě lomu d^* . Koeficienty β a X jsou následně stanoveny z porovnání se standardními zkouškami.

8.1.5 Stanovení faktoru intenzity napětí K_{IC}

V případě lomové houževnatosti vyjádřené faktorem intenzity napětí K pro křehké materiály, je nutné stanovit nejprve napětí σ_f^{SP} ze vztahu (11). Zde lze hodnotu faktoru intenzity napětí vypočítat z hodnot maximální síly při zatížení F_{MAX} a tloušťky vzorku h_0 . Dále je pak možné ze vztahu (10) stanovit konstantu „C“, která se získá korelací se standardními zkouškami.

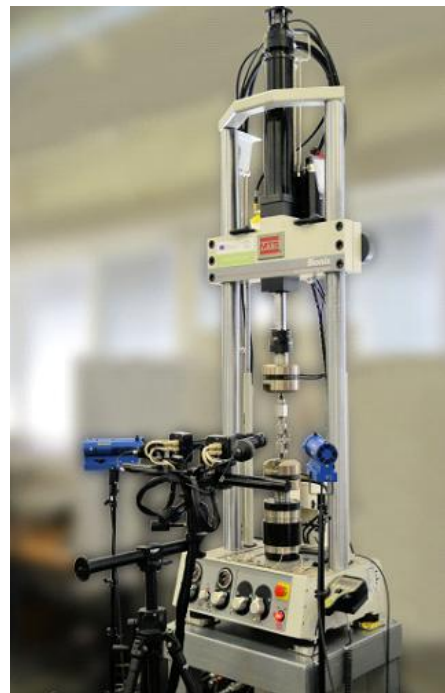
8.2 Provedení zkoušek Micro-Tensile Test

Zkoušky byly provedeny za konstantních podmínek na zkušebním servo-hydraulickém zařízení MTS o kapacitě 25 kN (Obr. 8.11) dvěma způsoby měření podélných deformací, přičemž prvotní měření probíhala za pomoci mechanického průtahoměru. Další zařízení pro měření deformace byl Videoextensometer. Veškeré zkoušky byly provedeny za shodných podmínek (rychlost posuvu příčnicku, teplota a zkušební prostředí).

Vzorky A, B, C, D (ocel 16 343) byly určeny pro prvotní porovnání za použití mechanického průtahoměru.

Snímač nebyl přímo umístěn na vzorku, ale na přípravku (Obr. 8.15). Rychlost posuvy příčnicku byla stanovena 0,5 mm/min tak, aby se deformační rychlost pohybovala dle ČSN EN ISO 6892-1.

ZM1, ZM2 a svarový kov – v případě zkoušení svarového spoje materiálů ZM1 a ZM2 bylo provedeno měření změny tahových vlastností napříč svarem a tepelně ovlivněnými oblastmi obou ZM. Rozteč mezi jednotlivými vzorky napříč svarem byla 1 mm. Toho bylo dosaženo použitím přesné metalografické pily. Před vlastním rozřezem na vzorky M-TT bylo provedeno měření tvrdosti HV1 přesně v místech, z nichž byly následně odebrány vzorky pro M-TT. Výsledky měření tvrdosti a M-TT byly následně porovnány napříč svarovým spojem.



Obr. 8.11 Zkušební zařízení MTS

8.2.1 Analýza geometrie vzorku

Návrh geometrie

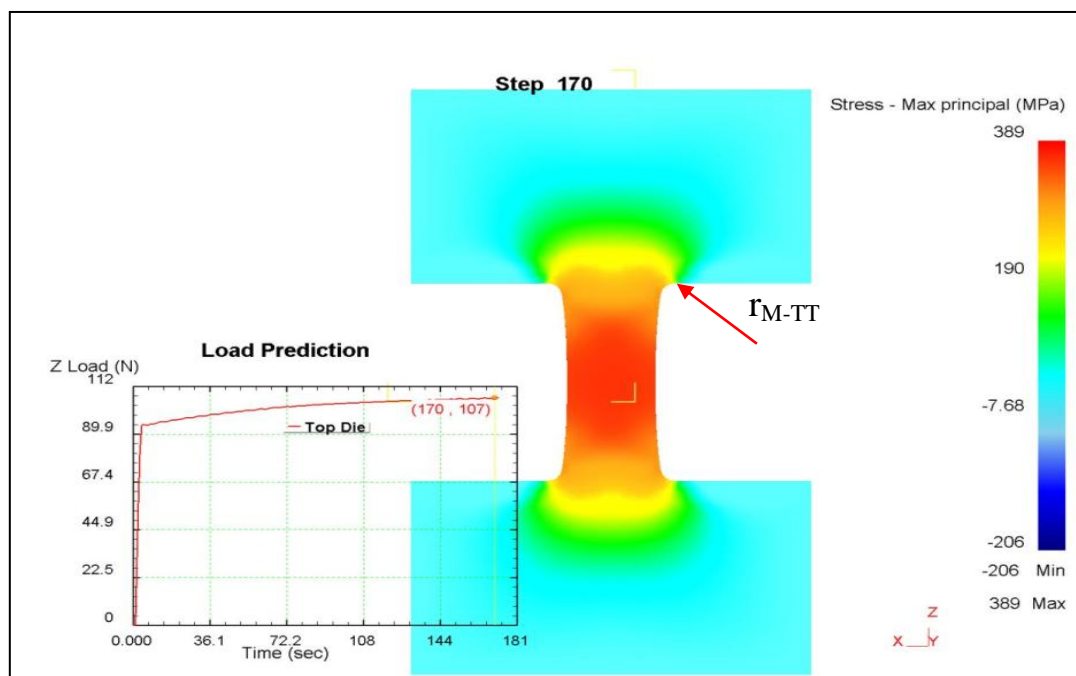
Geometrie vzorků byly podrobeny deformační analýze v programu DEFORM metodou konečných prvků (MKP). Zde se sledoval průběh napětí mezi tělem a hlavou vzorku v průběhu zatížení. Kritickým místem byl přechod mezi tělem a hlavou vzorku (radius). Ten byl uvažován, dle dostupných nástrojů, 0,2 mm

Analýza vycházela ze zjednodušeného modelu vzorku a vnějších rozměrů vzorku metody SP, přičemž bylo snahou dosáhnout, aby při maximálním zatížení bylo maximální napětí soustředěno uprostřed vzorku, respektive v těle vzorku. Nesmí tak docházet k namáhání

v přechodu tělo – hlava vzorku (přechodový rádius „ r_{M-TT} “), viz **Obr. 8.12**. Bylo tedy třeba vycházet z hodnot poměrů mezi přechodovým rádiusem, šířkou a zkušební délkou těla vzorku. V průběhu simulací za použití metody konečných prvků (MKP) v programu DEFORM bylo postupováno takto:

- radius přechodu tělo – hlava 1 mm, délka těla 1mm, šířku 1,5 mm (1:1:1,5)
- radius přechodu tělo – hlava 0,5 mm, délka těla 2mm, šířku 1,5 mm (0,5:2:1,5)
- radius přechodu tělo – hlava 0,2 mm, délka těla 2,6mm, šířku 1,5 mm (0,2:2,6:1:1,5)

Přičemž největší váhu měly rádiusy přechodů, ve kterých nesmí docházet ke koncentraci napětí a zároveň by měly nabývat co nejmenších hodnot tak, aby bylo možné z minimálních rozměrů vzorku získat maximální délku těla vzorku. Tedy velikost rádiusů přechodů je přímo závislá na délce těla zkušební vzorku. K tomu, aby bylo možné vyhodnotit tažnost materiálu, bylo zapotřebí dále stanovit správnou šířku vzorku. Ta byla stanovena na hodnotu 1,5 mm. Při této šířce je stále znatelný projev tažnosti a přitom si zachovává dostatečnou tuhost jak při samotné výrobě vzorku, tak při následné manipulaci a upínání do zkušebního zařízení.



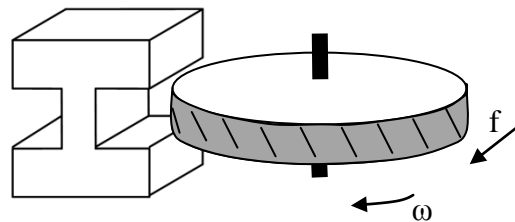
Obr. 8.12 Analýza geometrie vzorku pro konečný návrh (0,2:2,6:1:1,5), maximální napětí

8.2.2 Stanovení vhodného postupu výroby

Výroba zkušebních vzorků

S ohledem na výsledky deformační analýzy a požadavků na opracování byl stanoven postup přípravy vzorků a nástroje k tomu potřebné.

Samotnému měření předcházela příprava materiálu. Ta se skládala z přípravy vhodného polotovaru, který může být oválného nebo hranatého průřezu. Takto připravený materiál bylo nutné upnout do obráběcího stroje tak, aby bylo možné vést podél osy polotovaru drážku (**Obr. 8.13**), která musí být vytvořena z obou stran. Pro výrobu drážek byla použita kotoučová fréza. Protilehlé drážky musejí být rovnoběžné a nesmí se odchylovat od podélné osy. Tím by došlo ke zkrácení zkušební délky vzorku na hodnotu menší než 3 mm. Pokud je provedena drážka z obou stran v dostatečné kvalitě, nařeže se materiál na přesné metalografické pile na požadovanou tloušťku, která by měla být větší než 0,5 mm. Následně je povrch přebroušen na metalografickém papíru o hrubosti 1200. Pokud je vzorek vhodně připraven, změří a zapíše se rozměry zkušební části vzorku, jako je tloušťka, šířka a zkušební délka těla. V případě optických metod je nutné vhodně upravit povrch zkušebního vzorku, tak aby vyhovoval jejich požadavkům (tvorba kontrastů).

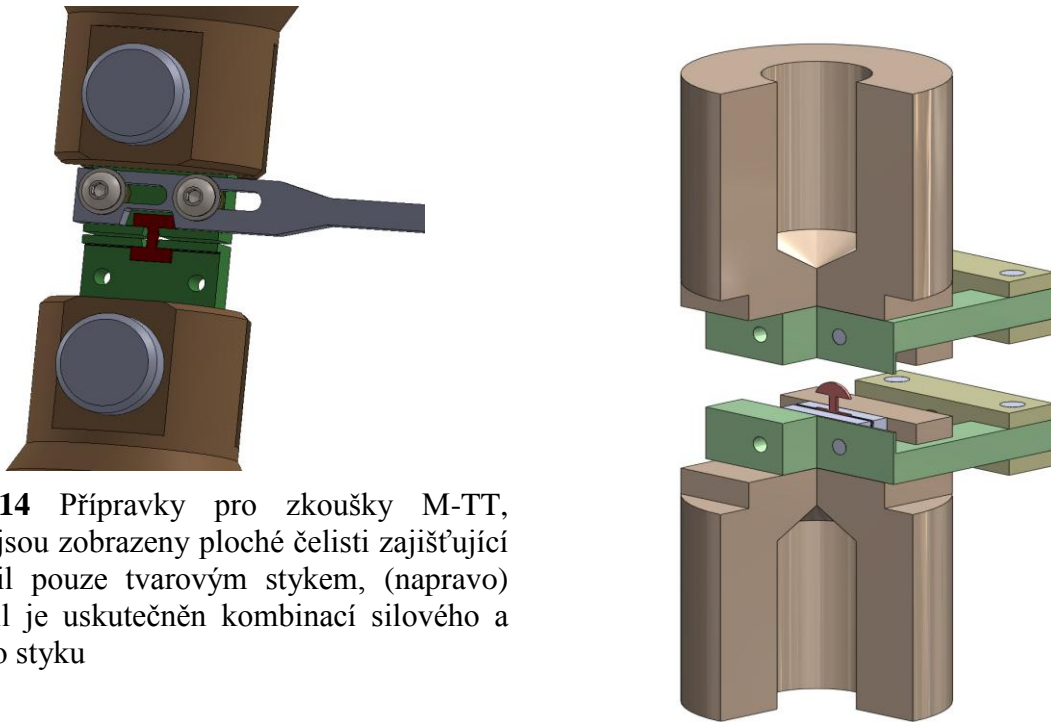


Obr. 8.13 Schéma výroby drážky kotoučovou frézou, sousledné frézování

8.2.3 Návrh a výroba upínacích čelistí

Volba upínacích přípravků pro zkoušky tahem byla zaměřena na dva typy. Prvním z nich byl systém velmi jednoduchý, nenáročný na výrobu, údržbu a obsluhu. Zajišťoval velmi snadný přístup ke zkušebnímu vzorku. Tento systém zajišťoval přenos síly mezi vzorkem a čelistmi pomocí tvarového styku, a to pouze v případech tahového napětí, **Obr. 8.14**. Druhým z nich byl složitější systém, který byl však schopen zajistit nejen přenos síly v tahu, ale i tlaku. Upnutí zajišťovala dvojice svěrných čelistí, které byly, z důvodů zvýšení přenosu sil mezi čelistmi a hlavami vzorku, zdrsňeny. V tomto případě byl přenos mezi vzorkem a čelistí kombinací silového a tvarového styku (vroubkované čelisti), **Obr. 8.14**.

Oba typy musely zajistit dostatečnou tuhost konstrukce, umožňovat přístup pro měření deformací optickými (nezakrytá část zkušebního těla vzorku) a mechanickými metodami zároveň. Po upnutí systému do rámu zkušebního zařízení nadále musejí tyto systémy umožnit vystředění zkušebního vzorku, které zajistí po celou dobu testu, že je vzorek namáhán pouze na čistý tah a neexistuje tam žádné jiné přidavné napětí, které by průběh testu ovlivnilo.



Obr. 8.14 Přípravky pro zkoušky M-TT, (nalevo) jsou zobrazeny ploché čelisti zajišťující přenos sil pouze tvarovým stykem, (napravo) přenos sil je uskutečněn kombinací silového a tvarového styku

8.2.4 Měření podélné deformace

Samotné měření probíhalo na zkušebním servo-hydraulickém zařízení MTS o kapacitě 25 kN (**Obr. 8.11**) tak, že pro každou metodu měření podélných deformací byl vyčleněn jeden zkušební materiál s odlišnými mechanickými vlastnostmi. Porovnání M-TT probíhalo pouze s výsledky ze standardních zkoušek. Nedošlo tedy k přímému srovnání metod měření podélných deformací na témže materiálu. Srovnání probíhalo primárně mezi M-TT (příslušnou metodou měření podélných deformací) a STT.

Před samotným měřením došlo u všech vzorků k řádnému proměření a zaznamenání rozměrů s přesností na setiny mm:

a_0 původní tloušťka [mm]

b_0 původní šířka [mm]

Aktivní délka těla vzorku byla vždy konstantních 2,6 mm. Přesné měření bylo velmi důležitou součástí vyhodnocení, miniaturizace rozměrů vzorků vyžaduje vysokou přesnost měření (μm).

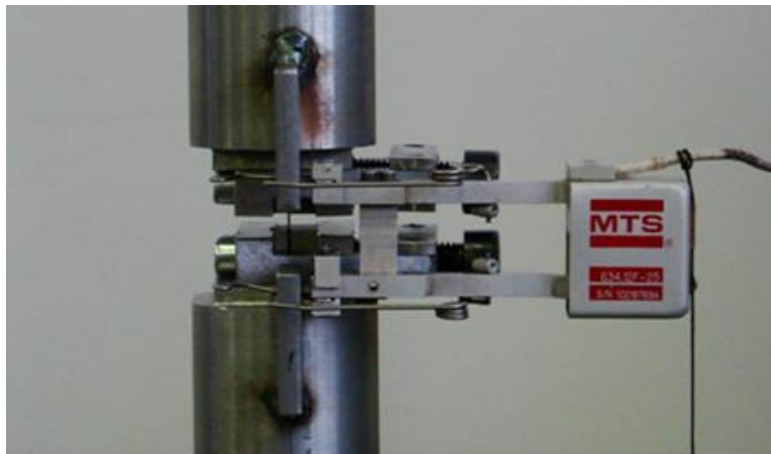
Vnější rozměry vzorků, vyjma předešle uvedených, jsou libovolné, a tak minimální rozměry respektovaly rozměry vzorků pro metodu SP. Vnější rozměry ve většině případů vycházely z polotovarů.

Mechanický průtahoměr

Prvotní porovnání probíhalo na laboratorním materiálu 16 343, a to ve 4 stavech tepelného zpracování. Tento materiál byl použit z důvodů malého výskytu vad a téměř izotropních mechanických vlastností v celém jeho objemu. Každý stav TZ vykazoval jiné mechanické vlastnosti. Bylo zde možné pozorovat celé spektrum chování materiálů od houževnatého až po křehký stav.

Příprava měření spočívala v kalibraci průtahoměru kalibračním měřidlem. Úprava povrchu vzorku nebyla nutná.

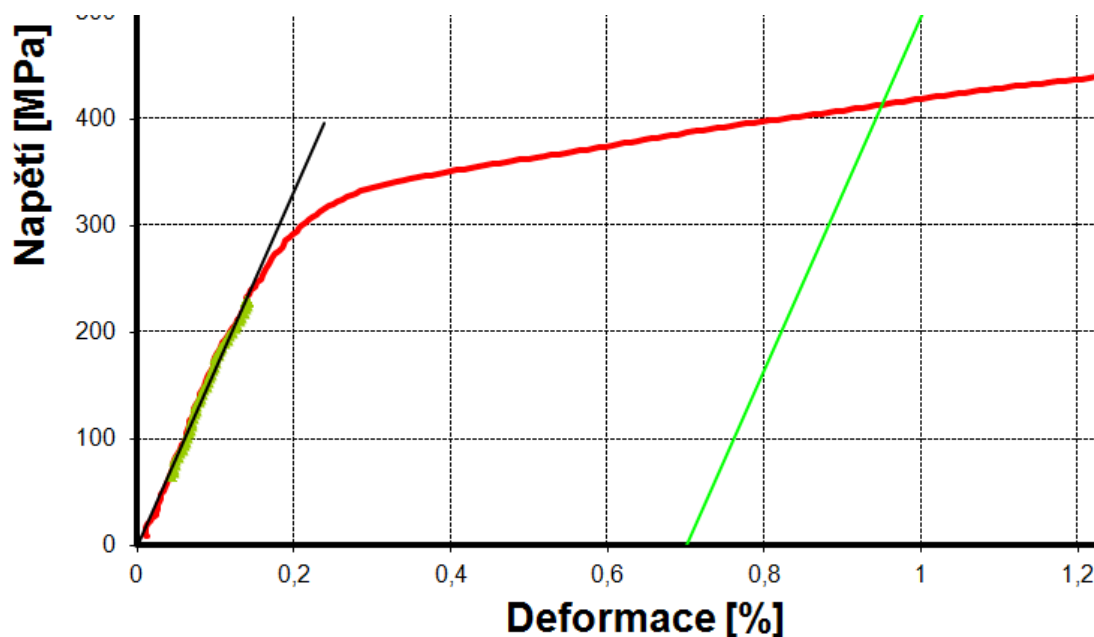
Použitý mechanický průtahoměr nebyl umístěn přímo na vzorku, jak tomu bývá zvykem, nýbrž na přípravku (**Obr. 8.15**). Z důvodů použití standardního mechanického průtahoměru (pro prvotní korelace) s počáteční vzdáleností mezi hroty 25 mm, nebylo možné umístit průtahoměr přímo na vzorek. V tomto případě byl průběh deformace ovlivněn tuhostí konstrukce upínacích přípravků.



Obr. 8.15 Umístění mechanického průtahoměru na čelistech

Průběh záznamů napětí - deformace vykazoval velmi stálý charakter a jeho reprodukovatelnost byla velmi vysoká, viz **Obr. 9.7**. Z těchto důvodů bylo možné stanovit postup vyhodnocení meze kluzu $R_{p0,2}$. V případě snížené tuhosti dochází v záznamu napětí - deformace k poklesu hodnot směrnice Youngova modulu. Tento pokles pokládá lineární část deformace směrem dolu. V takovém případě nelze určit skutečnou hodnotu meze kluzu zkušebního materiálu při trvalé deformaci 0,2 %, ta je kvůli nedostatečné tuhosti konstrukce zkrácena. Tato skutečnost byla vyřešena tím, že v průběhu vyhodnocování meze kluzu byla použita jiná hodnota trvalé deformace, která byla větší než 0,2 %. Pokryje tedy nedostatečnou tuhost konstrukce a bude ekvivalentem hodnot $R_{p0,2}$ pro STT.

V případech nepřímého umístění průtahoměru na vzorek byl určen ekvivalent trvalé (plastické) deformace na hodnotě 0,7 % ($R_{p0,7}$), **Obr. 8.16**.



Obr. 8.16 Vyhodnocení meze kluzu pro M-TT, $R_{p0,7}$

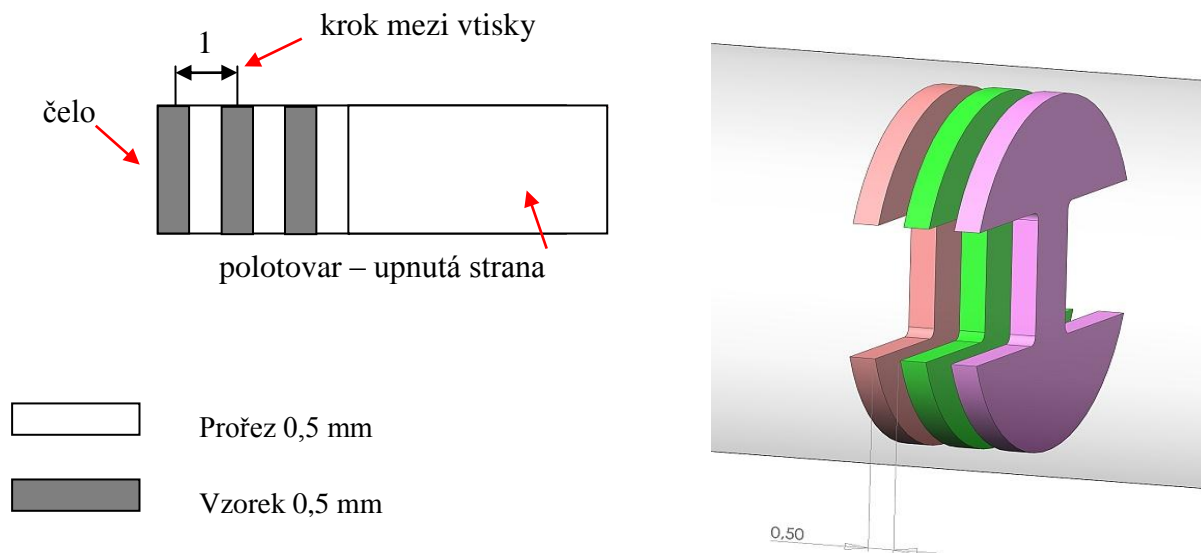
Systém Videoextensometer

Systém byl použit pro měření mechanických vlastností svarového spoje. Materiál pocházel z reálné konstrukce parní turbíny, kde došlo ke svaření dvou ocelových částí rotoru. Měření probíhala na ZM1, ZM2, svarovém kovu a v tepelně ovlivněných oblastech.

Příprava vzorků a nastavení systému

V tomto případě, bylo cílem získat vzorky pro M-TT v celém průběhu svarového spoje. Tomuto průběhu odpovídal i průběh tvrdosti (doplňkové měření). Měření probíhalo na automatickém mikrotvrdoměru Durascan se zatížením HV 1. Tvrdost byla měřena s krokem 1 mm tak, aby při následném rozřezu materiálu s prořezem 0,5 mm byly M-TT vzorky odebrány z míst, kde byla měřena tvrdost, **Obr. 8.17**.

V tomto případě byl rotor rozřezán na desky o tloušťce cca 10 mm. Deska byla v oblasti svarového spoje vybroušena a naleptána tak, aby se zvýraznila jeho kresba (**Obr. 8.18**). Leptání probíhalo po dobu 30 s leptadlem Lučavka. Je to směs kyseliny dusičné (HNO₃) a kyseliny chlorovodíkové (HCl) v poměru 1:3.



Obr. 8.17 Rozmístění vzorků M-TT v materiálu

Polotovar byl před samotným označen tak, aby nemohlo dojít k záměně vzorků ve vztahu ke vzdálenosti od čela. Ověření tvrdostí u vybraných vzorků M-TT prokázalo, že nedošlo k záměně vzorků.

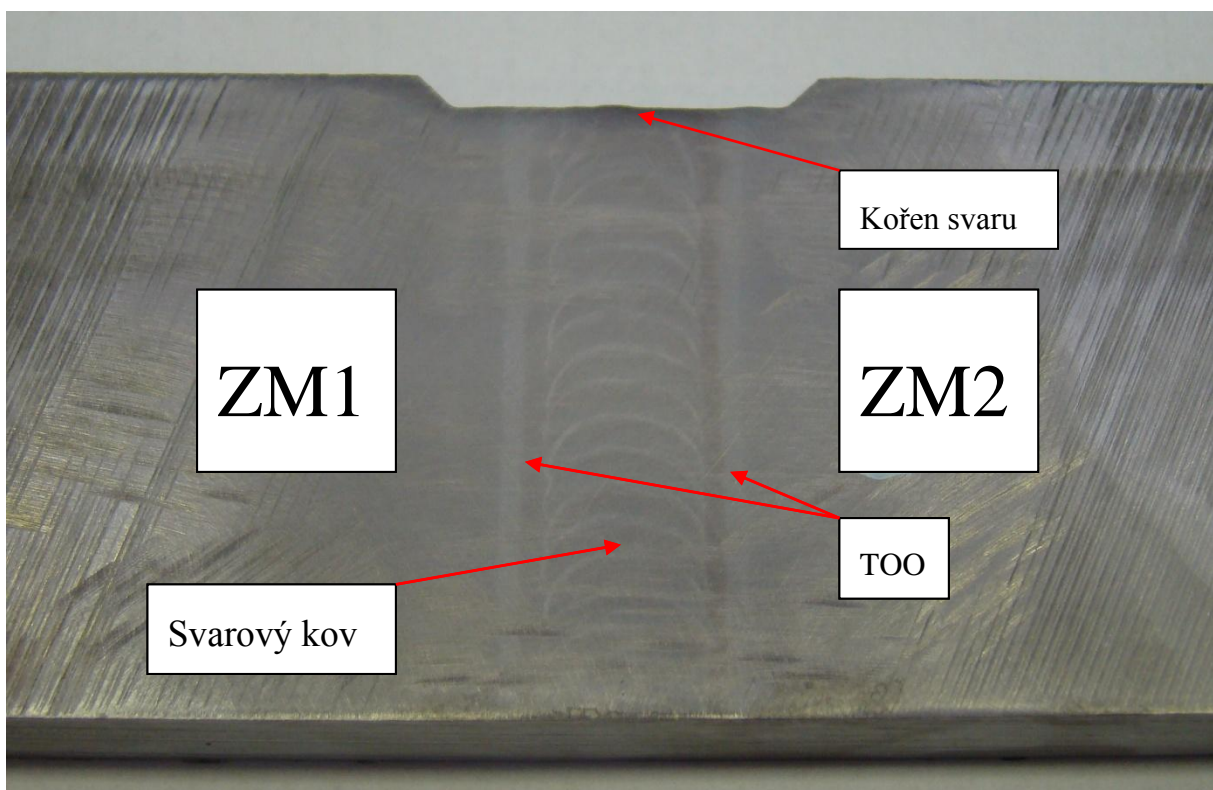
Dalším krokem bylo potřeba, jako v předchozích případech, změřit a zaznamenat rozměry vzorků. Dále bylo nutné vhodně připravit vzorky.

Zde bylo možné postupovat několika způsoby. Tím nejsnazším řešením bylo použít program (černý objekt a světlé pozadí). Povrch vzorku v tomto případě nebylo nutné upravovat. Zkušenosti z předchozích zkoušek ukázaly, že výsledky měření deformace v tomto režimu nejsou zcela objektivní. Velmi slibných výsledků dosahovaly režimy, kde bylo třeba získat kontrast na přechodu černá-bílá nebo naopak (pomocí zvýrazňovačů). V těchto případech bylo nutné vhodně nastavit osvětlení, respektive světelné podmínky, které musely být

v průběhu celého testu konstantní. K tomuto účelu posloužila jak přídavná světla, clonka kamery, tak i softwarové úpravy živého obrazu.

Nastavení světelných vhodných podmínek v mnohých případech trvalo v řádech minut. Samotná kalibrace systému se vyznačuje jednoduchostí a univerzálností. Pro kalibraci postačí pouze jeden předem známý rozměr, který může být přímo na vzorku (vzdálenost značek) nebo přímo známé rozměry vzorku. Není nutné tedy využívat různých kalibračních destiček a podobně.

Sledovaný U svar je znázorněn na **Obr. 8.18**. Vtisky při měření tvrdosti byly provedeny směrem zleva doprava, tedy ze ZM1 do ZM2, a to tvrdoměrem o zatížení HV 1 s krokem 1 mm. Každému bodu tvrdosti odpovídá mikro-tahová zkouška. To bylo umožněno malým prořezem metalografické pily 0,5 mm a tloušťkou vzorku 0,5-0,6 mm.



Obr. 8.18 Naleptaný svarový spoj oceli třídy 16 s viditelným U svarem a TOO

8.2.5 Vyhodnocení kontrakce Z

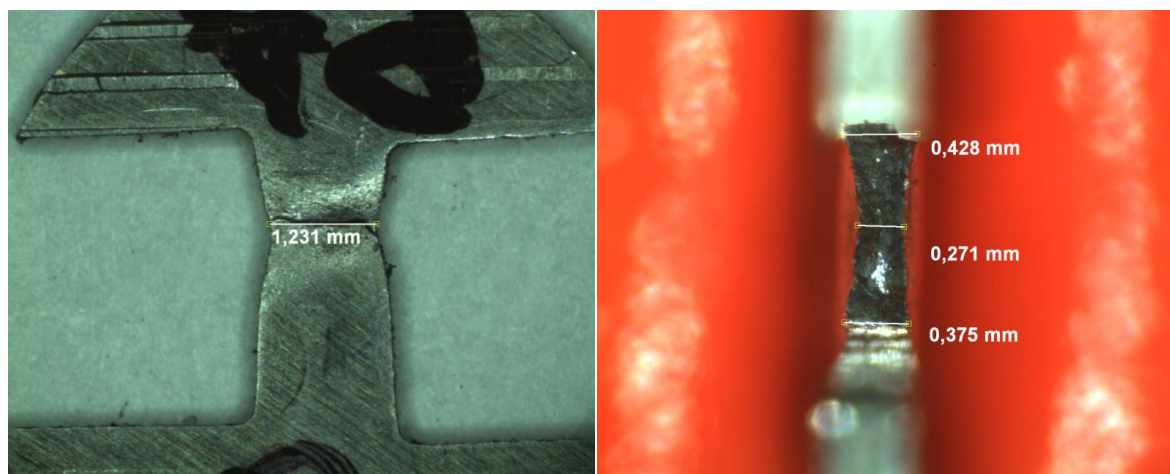
Mezi důležité mechanické vlastnosti se řadí i kontrakce. Zde bylo nutné po testu stanovit, jakým způsobem bude probíhat měření nejužších míst v oblastech krčku zkušebního vzorku. Způsobů, jak zjistit nejužší místo je několik. Byl kladen důraz na přesnost a jednoduchost měření.

Pro tyto účely bylo měření prováděno pomocí optického systému PIXEL FOX [19], kde byly použity 3 metody výpočtu konečného průřezu vzorku.

- Metoda nejmenších rozměrů
- Metoda přímého měření
- Metoda zjednodušeného výpočtu

a) Metoda nejmenších rozměrů

Pro zvolený způsob měření nejmenšího průřezu v oblasti lomu bylo nutné změřit, respektive nafotit více jak jeden snímek. Bylo nutné změřit konečnou šířku a konečnou tloušťku vzorku, **Obr. 8.19**. Největšího významu nabývaly minimální rozměry. Zjednodušený výpočet byl obsah obdélníku o stranách těchto minimálních rozměrů šířky a tloušťky. Výsledky takto získaných hodnot kontrakcí jsou uvedeny v **Tab. 8-1**.



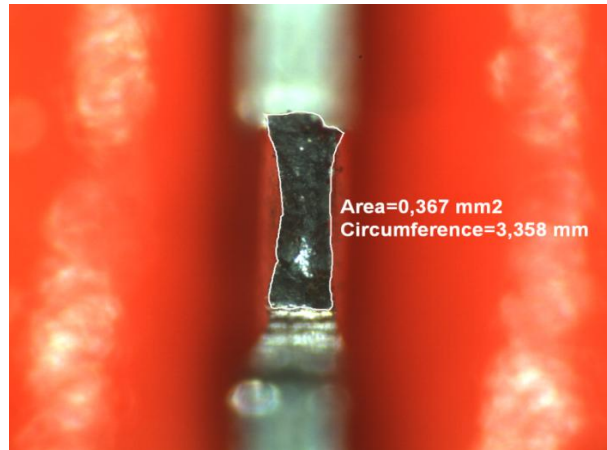
Obr. 8.19 Měření příčného zúžení, měření nejmenších rozměrů šířky a tloušťky vzorku

Tab. 8-1 Výsledky měření metodou minimálních rozměrů plochy S_{\min}

Minimální rozměry	a_{\min} [mm]	b_{\min} [mm]	S_{\min} [mm ²]
A9	0,30	1,21	0,36
A10	0,25	1,21	0,30
A14	0,25	1,21	0,30
B5	0,25	1,20	0,30
B6	0,21	1,18	0,25
B7	0,25	1,10	0,28
C4	0,27	1,05	0,28
C5	0,25	1,05	0,26
C8	0,23	0,95	0,22
D8	0,27	1,10	0,30
D10	0,33	1,28	0,42
D12	0,32	1,28	0,41

b) Metoda přímého měření

Přímé měření velikosti lomové plochy (**Obr. 8.20**) bylo velmi zdlouhavé a vyžadovalo přesné vedení kurzoru. Pokud došlo k přetažení, či nedotažení obrysu plochy, bylo nutné měření opakovat nebo je složitým způsobem opravit. Výsledky takto získaných hodnot kontrakcí jsou uvedeny v **Tab. 8-2**.



Obr. 8.20 Metoda přímého měření obsahu lomové plochy

Tab. 8-2 Výsledky přímého měření obsahu lomové plochy S_{\min}

Přímé měření	S_{\min} [mm ²]
A9	0,39
A10	0,34
A14	0,35
B5	0,35
B6	0,29
B7	0,28
C4	0,29
C5	0,26
C8	0,22
D8	0,34
D10	0,46
D12	0,43

c) Metoda zjednodušeného výpočtu

Při stanovení kontrakcí byla východiskem geometrie vzorku v oblasti lomu, která ve většině případů vykazovala tvar podélného průřezu rotačního hyperboloidu (**Obr. 8.21**). Proto se při výpočtu plochy vycházelo ze známých geometrických vztahů. V tomto případě ze znalosti výšky kruhové úseče. Tu bylo možné spočítat ze znalostí rozměrů a_{\max} a a_{\min} , které reprezentovaly nejužší, respektive nejširší oblast lomové plochy. Úseč reprezentuje délka kruhového oblouku l_z a tětiva t_z . Dále bylo možné získat délku kruhového oblouku (19) a také poloměr kruhu (20).

$$l_z = \sqrt{t_z^2 + \frac{16}{3} * v_z^2} \quad (19)$$

l_z délka kruhového oblouku

v_z výška kruhové výseče

t_z délka tětivy

$$r_z = \frac{\left(\frac{t_z}{2}\right)^2 + v_z^2}{2 \cdot v_z} \quad (20)$$

r_z poloměr kruhu

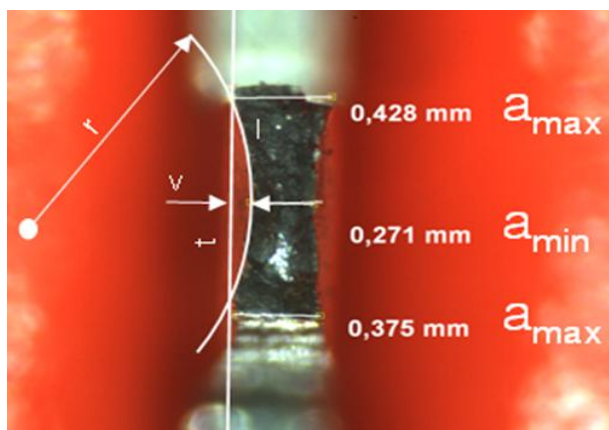
Aplikací vzorců (19, 20) do softwaru Microsoft Excel bylo další stanovení délky tětivy a poloměru oblouku snadné a bylo tak možné spočítat minimální průřez (21). Ten představuje obsah obdélníku vypočítaný z maximální tloušťky a_{\max} a tětivy t_z , od něhož jsou odečteny dvě kruhové výseče.

$$S_{\min} = a_{\max} \cdot t - [l \cdot r - t \cdot (r - v)] \quad (21)$$

a_{\max} maximální tloušťka vzorku v místě lomu

Takto vyjádřený průřez S_{\min} byl dále použit pro výpočet kontrakce Z (22), výsledky viz **Tab. 8-3**.

$$Z = \frac{S_0 - S_{\min}}{S_0} * 100 \quad (22)$$



Obr. 8.21 Metoda zjednodušeného výpočtu

Tab. 8-3 Výsledky metody zjednodušených výpočtů S_{min}

Zjednodušený výpočet	S_u [mm ²]	l [mm]	r [mm]	v [mm]	t [mm]	a_{max} [mm]	a_{min} [mm]	S_{min} [mm ²]
A9	0,04	1,22	1,74	0,05	1,21	0,40	0,30	0,41
A10	0,04	1,22	1,66	0,06	1,21	0,36	0,25	0,36
A14	0,04	1,22	1,54	0,06	1,21	0,37	0,25	0,36
B5	0,04	1,21	1,65	0,06	1,20	0,36	0,25	0,35
B6	0,05	1,19	1,18	0,08	1,18	0,36	0,21	0,32
B7	0,04	1,11	1,39	0,06	1,10	0,36	0,25	0,33
C4	0,02	1,05	2,34	0,03	1,05	0,33	0,27	0,31
C5	0,02	1,05	2,01	0,03	1,05	0,32	0,25	0,29
C8	0,03	0,96	1,04	0,06	0,95	0,34	0,23	0,26
D8	0,04	1,11	1,11	0,07	1,10	0,41	0,27	0,36
D10	0,03	1,28	2,93	0,04	1,28	0,40	0,33	0,46
D12	0,03	1,28	2,64	0,04	1,28	0,40	0,32	0,45

9. Výsledky klasických a netradičních zkoušek

Účelem porovnání v případě SPT, zejména pro určení meze pevnosti a meze kluzu, je získat představu o tom, zda jsou porovnávané vztahy nebo veličiny závislé. Pokud se mezi standardními metodami a metodou SPT prokáže korelace, je pravděpodobné, že na sobě závisí. Tedy pokud se jedna z nich mění, mění se korelativně i druhá a naopak. Vztahy, které na sobě zcela lineárně závisí, nabývají hodnot od -1 do +1 (hodnoty korelačních koeficientů R). V případě kladných hodnot obě proměnné stoupají a v případě záporných, jedna z proměnných stoupá a druhá klesá. V případě M-TT bylo účelem zjistit, o kolik procent se hodnoty vybraných výsledků mechanických vlastností liší od hodnot získaných STT.

9.1 Standard Tensile Test

Pro následující přímé porovnání netradičních metod s metodami klasickými bylo provedeno pro každý použitý experimentální materiál několik zkoušek.

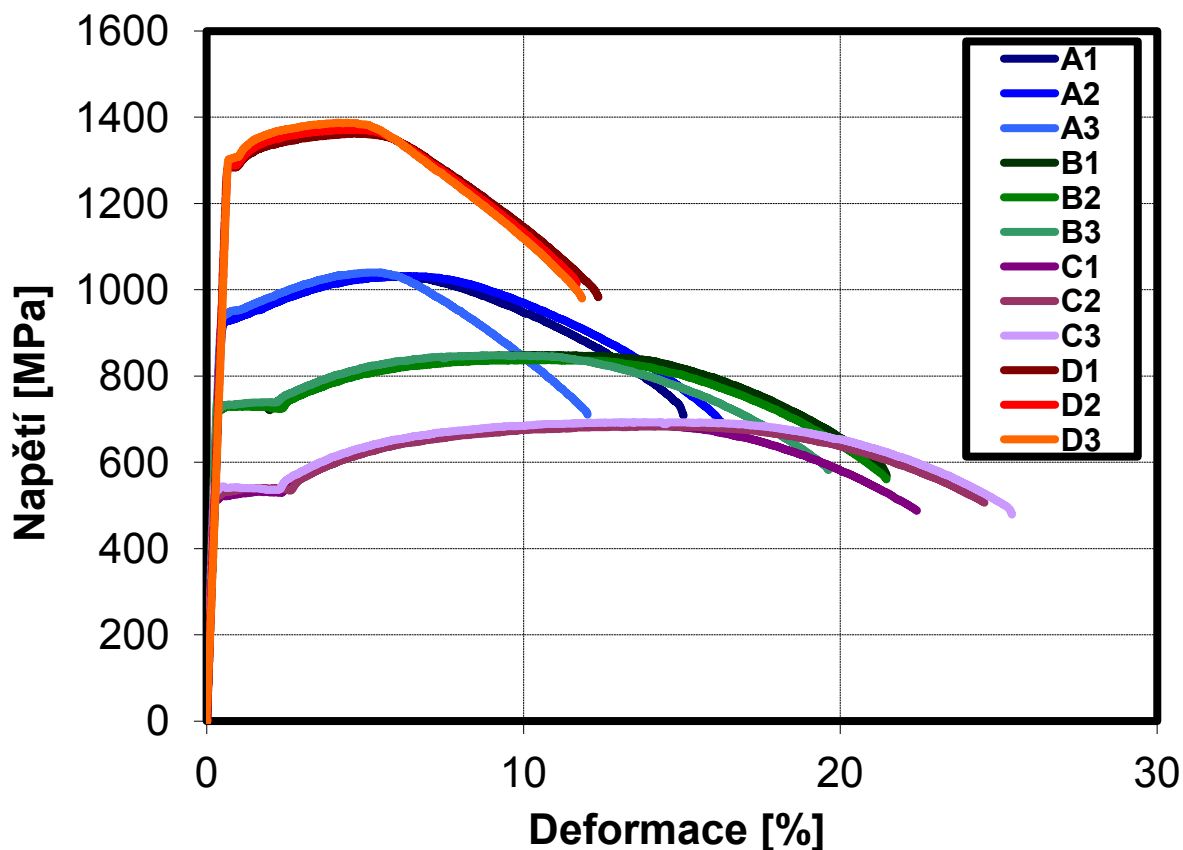
9.1.1 Ocel 16 343

Vzhledem k ověřeným mechanickým hodnotám byla použita, jako laboratorní materiál, ocel 16 343. Materiál s označením A, B, C a D reprezentuje různé stavy tepelného zpracování, viz 4.2.1.

Pro každý stav tepelného zpracování byly provedeny 3 standardní tahové zkoušky a výsledky jsou uvedeny v **Tab. 9-1** a na **Obr. 9.1**.

Tab. 9-1 Výsledky STT pro ocel 16 343

Vzorek	D ₀ [mm]	D _u [mm]	R _{p0,2} [Mpa]	R _m [MPa]	A [%]	Z [%]
A1	5,0	3,4	925,4	1030,3	15,4	53,4
A2	5,0	3,3	927,9	1032,0	16,0	57,1
A3	5,0	3,3	942,8	1040,3	15,4	56,8
A	5,0	3,3	932,0	1034,2	15,6	55,8
B1	5,0	3,0	730,8	848,7	21,5	62,6
B2	5,0	3,0	722,8	837,2	20,4	63,5
B3	4,8	3,1	726,7	848,1	19,8	59,1
7B	4,9	3,0	726,8	844,7	20,5	61,7
C1	4,9	3,0	518,0	687,6	23,2	62,1
C2	4,9	3,0	525,2	683,6	25,8	64,1
C3	4,9	3,0	542,0	693,6	25,4	63,2
C	4,9	3,0	528,4	688,3	24,8	63,1
D1	5,0	3,7	1283,9	1362,4	12,6	45,7
D2	5,0	3,7	1286,1	1371,8	18,0	44,7
D3	5,0	3,7	1305,8	1387,6	11,2	46,5
D	5,0	3,7	1291,9	1373,9	13,9	45,6



Obr. 9.1 Grafy STT oceli 16 343 ve 4 stavech TZ

Pro účely porovnávání bylo použito průměrných hodnot výsledků STT pro zkušební materiály s označením A, B, C a D. Těmito hodnotami jsou $R_{p0,2}$, R_m , A a Z. Směrodatné odchylky (σ_{so}) jsou uvedeny v **Tab. 9-2**.

Tab. 9-2 Směrodatná odchylka výsledků pro STT oceli 16 343

	Materiál	$R_{p0,2}$	R_m	A	Z
σ_{so}	A	9,43	5,38	0,36	2,04
	B	3,99	6,45	0,89	2,34
	C	12,32	5,06	1,39	0,99
	D	12,08	12,76	3,56	0,92

9.1.2 ZM1, ZM2 a svarový kov

Oceli třídy 16 byly svařeny po celém jejich obvodu svarem „U“. Svarový kov je tedy v příčném řezu vůči podélné ose rotoru téměř obdélníkového tvaru. Tepelně ovlivněná oblast (TOO) je v tomto případě rovnoměrná a nabývá stejného tvaru. Tahové zkoušky byly provedeny v pořadí:

- **Základní materiál 1 (ZM1)**

Tab. 9-3 Výsledky STT pro ZM1

Vzorek	D ₀ [mm]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	Z [%]
ZM1	9,9	622,1	762,3	20,7	63,9

- **Základní materiál 2 (ZM2)**

Tab. 9-4 Výsledky STT pro ocel ZM2

Vzorek	D ₀ [mm]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	Z [%]
ZM2	10,0	623,1	756,5	19,2	64,3

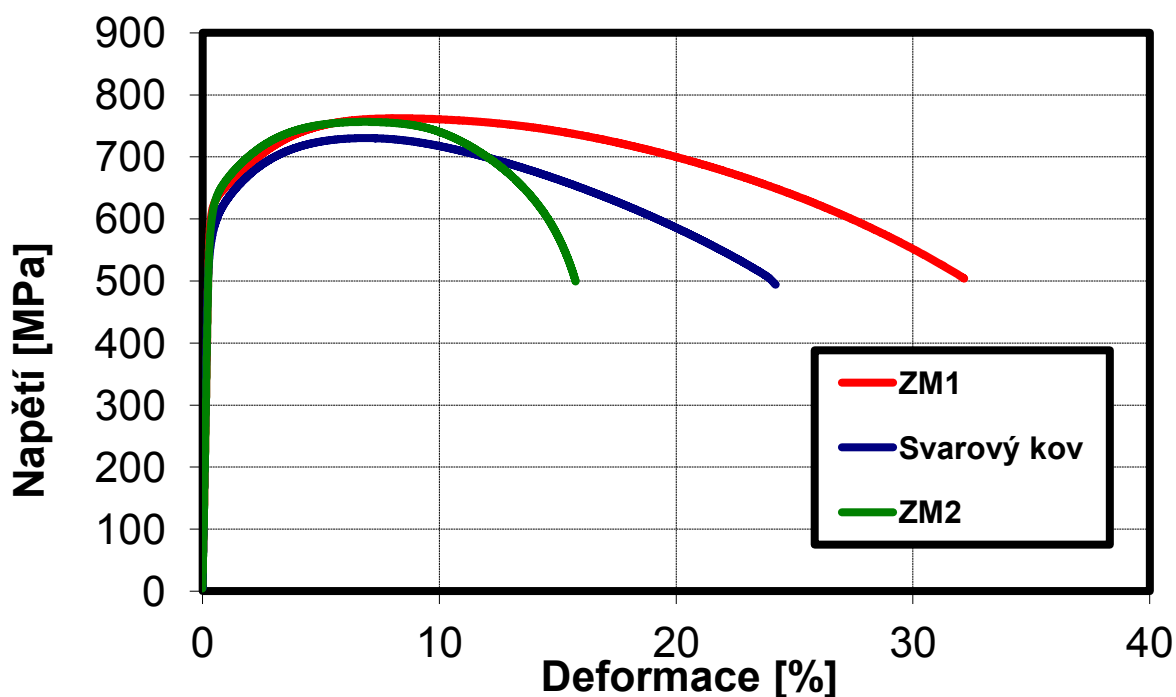
- **Svarový kov**

Tab. 9-5 Výsledky STT pro svarový kov

Vzorek	D ₀ [mm]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	Z [%]
Svarový kov	9,9	579,0	730,4	14,3	63,2

Výsledky STT jsou průměrnými hodnotami třech platných měření.

Reprezentativní charakteristiky napětí – deformace pro tyto materiály jsou uvedeny na **Obr. 9.2**.



Obr. 9.2 Grafy závislosti napětí na deformaci pro svarový spoj

9.2 Small Punch Test

Jednotlivé zkušební vzorky byly vyhodnoceny tak, že poskytují veškerá vstupní data nutná pro výpočet požadovaných mechanických vlastností. Hodnoty pro materiál 16 343 jsou uvedeny v **Tab. 9-6**.

Tab. 9-6 Výsledky metody SPT pro materiál 16 343

Vzorek	F_m [N]	F_e [N]	d_m [mm]	d^* [mm]	E^{SP} [mJ]	F^* [N]	$h_{f\ min}$ [mm]	$h_{f\ max}$ [mm]	h_0 [mm]
A_1	2656,4	392,7	1,65	1,71	2884,6	2540,3	0,257	0,266	0,505
A_2	2401,3	375,7	1,58	1,67	2587,0	2327,0	0,244	0,248	0,490
A_3	2516,9	404,9	1,60	1,74	2890,5	2415,0	0,218	0,231	0,505
A	2524,8	391,1	1,6	1,71	2787,4	2427,4	0,240	0,248	-
B_1	2281,9	315,3	1,72	1,95	2952,0	1098,9	0,207	0,207	0,505
B_2	2167,6	289,5	1,63	1,86	2660,6	1276,5	0,211	0,218	0,496
B_3	2100,5	265,8	1,52	1,97	2838,4	759,9	0,177	0,183	0,495
B_4	2197,1	262,5	1,65	1,95	2903,5	1331,4	0,191	0,205	0,502
B_5	2191,4	295,4	1,68	1,93	2823,7	825,7	0,190	0,209	0,504
B_6	2213,3	285,5	1,68	1,92	2818,5	826,5	0,226	0,243	0,503
B_7	2175,5	306,7	1,55	2,02	2972,8	785,1	0,184	0,193	0,501
B_8	2169,4	270,2	1,56	2,07	3089,1	609,0	0,180	0,181	0,501
B	2187,1	286,4	1,6	1,96	2882,3	939,1	0,196	0,205	-
C_1	1856,5	191,0	1,64	2,01	2431,0	663,0	0,206	0,212	0,501
C_3	1787,8	187,5	1,68	2,04	2444,5	1259,5	0,168	0,200	0,500
C_4	1855,2	187,2	1,73	2,04	2510,8	1102,1	0,174	0,181	0,504
C_5	1872,4	184,2	1,64	2,03	2511,2	1660,6	0,187	0,190	0,503
C_6	1825,9	196,0	1,64	2,03	2439,2	1710,0	0,152	0,163	0,500
C	1839,6	189,2	1,7	2,03	2467,3	1279,0	0,177	0,189	-
D_1	2213,1	575,7	0,94	1,05	1508,3	1569,9	0,410	0,415	0,504
D_2	2234,4	359,3	0,98	1,04	1528,7	1625,8	0,386	0,416	0,504
D_3	2676,7	453,1	1,12	1,24	2074,8	1199,1	0,371	0,406	0,499
D_4	2203,7	506,9	0,95	1,05	1522,9	1610,7	0,379	0,413	0,504
D_5	2216,6	641,7	0,97	1,07	1515,1	1465,9	0,405	0,417	0,504
D_6	2203,9	442,3	0,96	1,03	1477,7	1470,2	0,426	0,427	0,503
D_7	2116,0	616,8	0,90	1,07	1532,9	1428,9	0,394	0,401	0,505
D_8	2192,8	513,1	0,95	1,05	1502,9	1445,0	0,398	0,400	0,503
D	2257,1	513,6	1,0	1,07	1582,9	1476,9	0,396	0,412	-

9.3 SPT – přechodová teplota T_{SP}

Stanovení přechodového koeficientu teploty FATT podle vztahu (12) předchází zjištění hodnot T_{SP} podle vztahu (13). Pro materiály s označením Ocel 1 a Ocel 2 je nutné získat hodnoty jednotlivých energií při různých teplotách. Ty získáme ze vztahu (15). Hodnoty energií takto (v závislosti na teplotě) vypočtených jsou uvedeny v **Tab. 9-7**, respektive v **Tab. 9-8**.

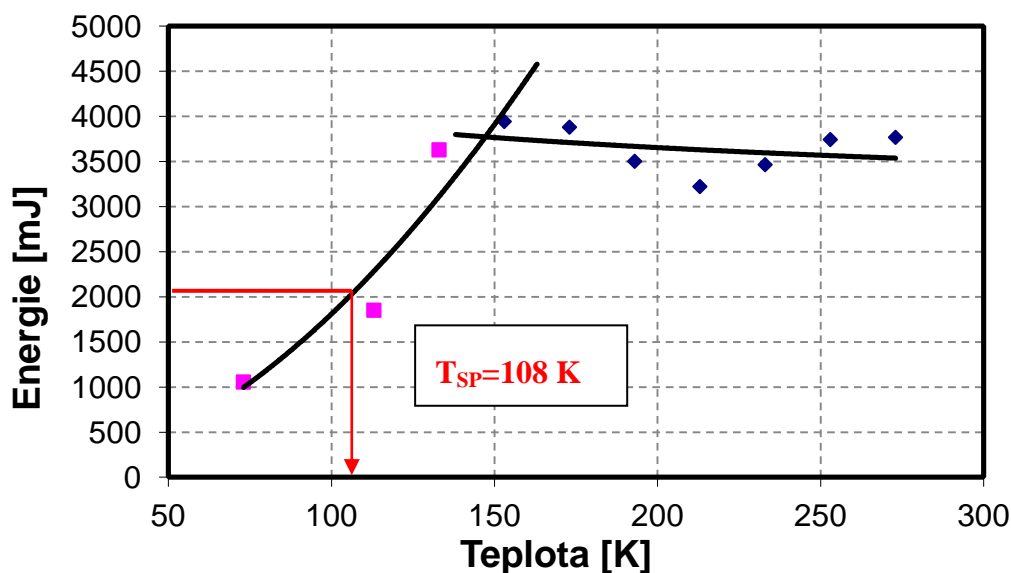
Tab. 9-7 Hodnoty energií pro Ocel 1

Teploty		Energie
[K]	[°C]	[mJ]
273	0	3765
253	-20	3741
233	-40	3463
213	-60	3220
193	-80	3500
173	-100	3878
153	-120	3941
133	-140	3627
113	-160	1850
73	-200	1055

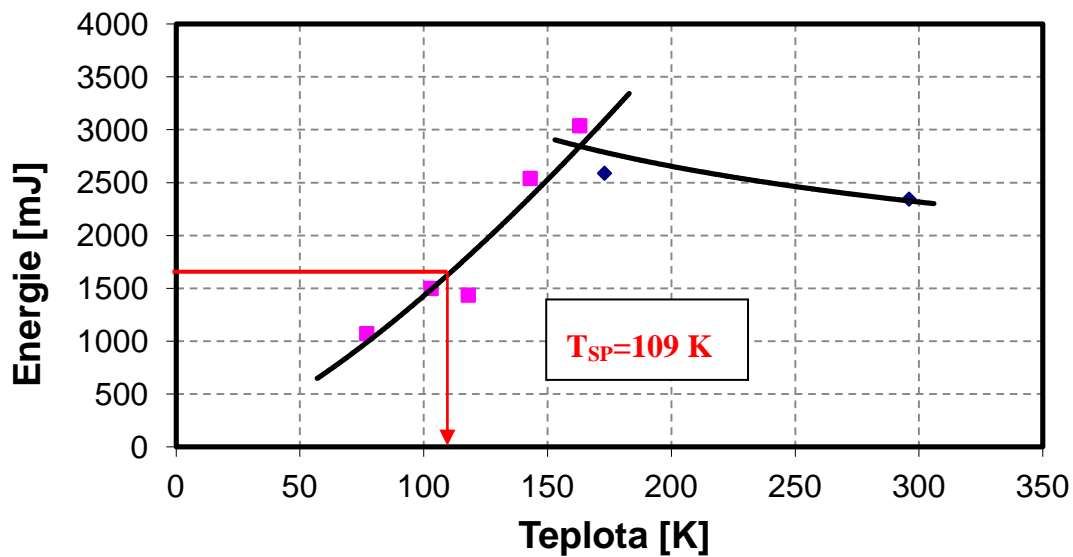
Tab. 9-8 Hodnoty energií pro Ocel 2

Teploty		Energie
[K]	[°C]	[mJ]
296	23	2344
173	-100	2276
163	-110	3038
143	-130	2540
118	-155	1440
103	-170	1500
77	-196	1074

Hodnoty energií a teplot z **Tab. 9-7** a **Tab. 9-8** jsou vyneseny do grafů, proloženy se křivkami a podle vztahu (13) jsou vypočteny střední hodnoty energií. Z takto získaných středních energií (E_{STR}) je stanovena přechodová teplota (T_{SP}), viz 4.1. Výsledné hodnoty přechodových teplot pro SP jsou uvedeny na **Obr. 9.3** a **Obr. 9.4**.



Obr. 9.3 Stanovení T_{SP} ze závislosti energie - teplota, Ocel 1



Obr. 9.4 Stanovení T_{SP} ze závislosti energie - teplota, Ocel 2

Z takto získaných přechodových teplot pro SP a známých přechodových teplot FATT pro Ocel 1 (14°C) a Ocel 2 (-39°C), byly po dosazení do vztahu (12) získány následující koeficienty α viz **Tab. 9-9**.

Tab. 9-9 Výsledné hodnoty koeficientů α

	Ocel 1	Ocel 2
α	0,38	0,46

9.4 SPT – mez kluzu a mez pevnosti

Hodnoty z **Tab. 9-6** byly použity pro výpočet $R_{p0,2calc}$ a R_{mcalc} podle vzorce (17), respektive (18). Takto vypočtené hodnoty napětí pro SP, jsou uvedeny v **Tab. 9-10**, respektive v **Tab. 9-11**.

Tab. 9-10 Výsledky $R_{p0,2calc}$

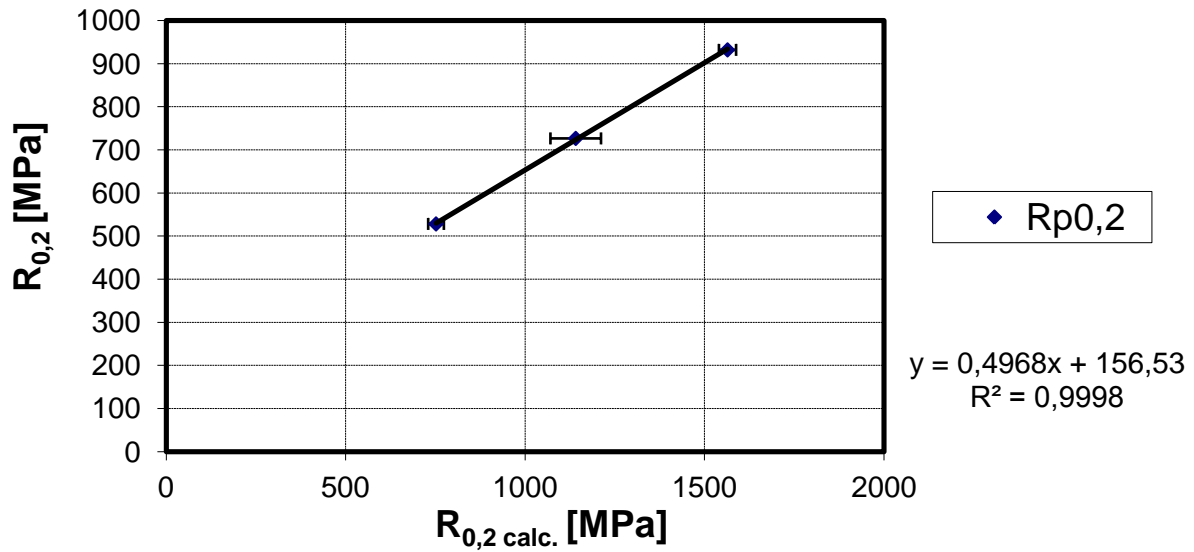
Vzorek	$R_{p0,2 calc}$ [MPa]	$R_{p0,2 calc str}$ [MPa]	Střední odchylka
A_1	1540,0	1564,1	23,9
A_2	1564,8		
A_3	1587,7		
B_1	1236,5	1141,2	70,5
B_2	1176,8		
B_3	1084,7		
B_4	1041,7		
B_5	1163,0		
B_6	1128,5		
B_7	1221,7		
B_8	1076,3		
C_1	761,0	752,0	21,8
C_3	749,9		
C_4	736,9		
C_5	728,1		
C_6	783,9		

Tab. 9-11 Výsledky R_{mcalc}

Vzorek	R_{mcalc} [MPa]	$R_{mcalc str}$ [MPa]	Střední odchylka
A_1	3085,1	2958,2	115,1
A_2	2928,8		
A_3	2860,6		
B_1	2323,0	2233,9	91,2
B_2	2352,5		
B_3	2155,3		
B_4	2250,2		
B_5	2252,8		
B_6	2291,5		
B_7	2151,0		
B_8	2095,2		
C_1	1841,5	1806,7	34,8
C_3	1753,2		
C_4	1801,4		
C_5	1834,0		
C_6	1803,1		

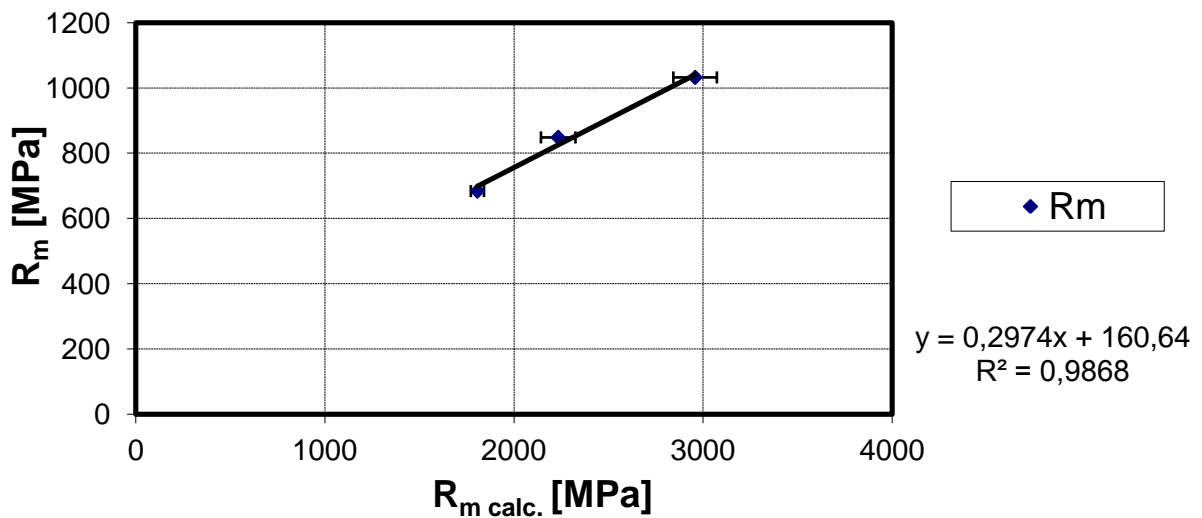
Korelace výsledků SPT a STT je výlučně zaměřena na houževnaté materiály, tedy na ty materiály, které se pohybují nad hodnotou 0,25 efektivní lomové deformace. Tuto podmínku splňují materiály A, B a C (**Tab. 9-13**). Hodnoty meze kluzu a meze pevnosti jsou vyneseny do grafů (**Obr. 9.5** a **Obr. 9.6**). V těchto grafech nejsou viditelné chybové úsečky se směrodatnou odchylkou pro osu Y, protože se jejich hodnoty blíží nule, viz **Tab. 9-2**. Proložíme-li data lineární regresí, získáme korekční koeficienty pro vztahy (5) a (6) (parametry přímky), viz **Tab. 9-12**.

Střední hodnoty meze kluzu + směrodatné odchylky



Obr. 9.5 Korelace mezi kluzu dle metod SPT a STT

Střední hodnoty meze pevnosti + směrodatné odchylky



Obr. 9.6 Korelace mezi pevnosti dle metod SPT a STT

Tab. 9-12 Experimentálně stanovené parametry pro přepočet meze kluzu a meze pevnosti mezi SPT a STT

Parametry přímky	Mez kluzu	Mez pevnosti
β	0,4968	0,2974
C	156,53	164,64

9.5 SPT – lomová houževnatost

Pro výpočet lomové houževnatosti J_{IC} bylo potřeba nejprve vypočítat efektivní lomové deformace podle vztahu (8). Pro zjištění faktoru intenzity napětí K_{IC} bylo potřeba získat hodnoty napětí pro SP dle vztahu (11). Hodnoty takto vypočítaných efektivních lomových deformací a napětí, jsou uvedeny v **Tab. 9-13**. Pro efektivní lomovou deformaci podle vztahu (9) je nutné získat korekční vztahy přímým porovnáním se standardními zkouškami. Z tohoto důvodu proběhne vyhodnocení až v porovnávací části práce.

Tab. 9-13 Hodnoty efektivní lomové deformace a napětí pro SP pro ocel 16 343

Vzorek	$\varepsilon_f \ln(h_0/h_f)$ [-]	σ^{SP} [MPa]
A_1	0,66	1034,1
A_2	0,69	980,1
A_3	0,81	963,0
A	0,72	992,4
B_1	0,89	843,2
B_2	0,84	825,4
B_3	1,01	794,4
B_4	0,93	813,4
B_5	0,93	801,5
B_6	0,76	817,3
B_7	0,98	806,7
B_8	1,02	803,6
B	0,92	813,2
C_1	0,87	641,5
C_3	1,00	609,7
C_4	1,04	629,5
C_5	0,98	642,1
C_6	1,16	629,5
C	1,01	630,4
D_1	0,20	812,6
D_2	0,23	823,5
D_3	0,25	1077,5
D_4	0,24	807,8
D_5	0,20	814,4
D_6	0,16	812,4
D_7	0,24	758,6
D_8	0,23	806,7
D	0,22	839,2

9.6 Micro-Tensile Test

Metoda nevyžaduje pro hodnocení mechanických vlastností žádných korekčních vztahů, lze její pomocí získat mechanické hodnoty přímo, a to bez nutné předchozí znalosti hodnot ze STT. Zde jsou uvedeny výsledky měření pro materiál 16 343 a svarový spoj ocelí tříd 16. Aby bylo možné vyhodnotit výsledky M-TT jednotně, bylo v první řadě nutné sjednotit metodu měření kontrakce Z.

9.6.1 Stanovení kontrakce pro M-TT

Cílem bylo stanovit způsob postupu při vyhodnocování kontrakcí miniaturizovaných tahových zkoušek. Pro srovnání bylo použito 3 postupů.

Porovnáním výsledků kontrakcí (**Tab. 9-14**) všech metod M-TT a STT (ideální) bylo zjištěno, že nejlepších výsledků dosahuje metoda, která přímo měří nejužší místa v oblastech lomu (krčku). Tato metoda je nejen nejpřesnější, ale v porovnání s ostatními méně náročná, jak z hlediska času, tak i z hlediska jednoznačnosti vyhodnocení. Touto metodou jsou nadále měřeny veškeré kontrakce u metody M-TT.

Tab. 9-14 Výsledky jednotlivých metod výpočtu kontrakcí Z

M. nejmenších rozměrů [%]	M. přímého měření [%]	M. zjed. výpočtů [%]	Ideální [%]
53,2	49,9	46,2	53,4
59,3	54,2	51,7	57,1
58,0	51,7	49,6	56,8
60,8	54,1	53,6	62,6
66,5	60,9	56,6	63,5
63,2	62,4	56,4	59,1
61,3	61,1	57,8	62,1
64,5	64,3	60,4	64,1
66,9	66,1	60,3	63,2
45,1	49,4	46,4	45,7
45,1	40,8	40,3	44,7
46,5	43,6	41,1	46,5

- Metoda nejmenších rozměrů se, z uvedených metod, nejvíce blížila hodnotám „Ideální kontrakce“
- Ideální – kontrakce získané ze STT

9.6.2 M-TT - mechanický průtahoměr

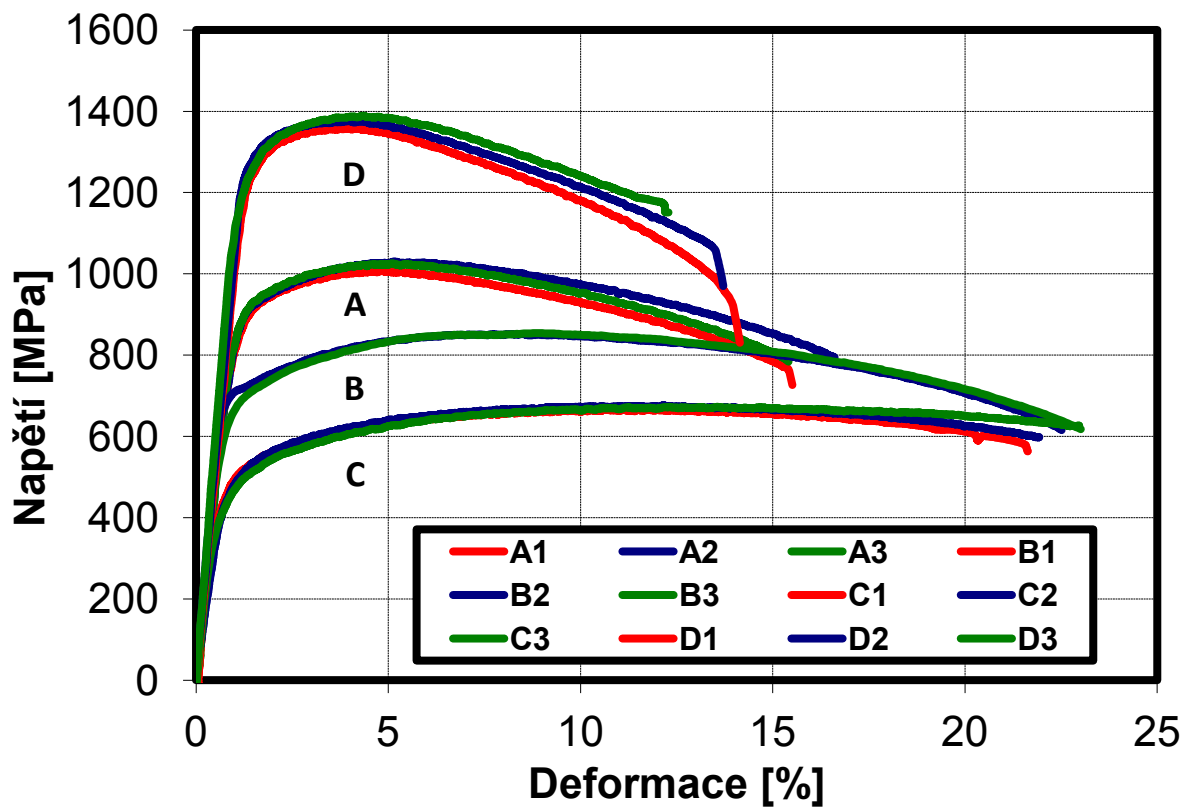
Vyhodnocení probíhalo v souladu se standardními tahovými zkouškami, a tak jediným rozdílem bylo použití odlišného postupu při stanovení kontrakce Z. Viz kapitola 8.2.5, bylo použito metody nejmenších rozměrů. Pro každý stav TZ (A, B, C, D) byly provedeny 3 mikro-tahové zkoušky, výsledky viz **Tab. 9-15**. Hodnoty směrodatných odchylek jsou uvedeny v **Tab. 9-16**.

Tab. 9-15 Výsledky M-TT pro ocel 16 343

Vzorek	a ₀ [mm]	b ₀ [mm]	R _{p0,7} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	Z [%]
A1	0,51	1,53	929,8	1007,5	16,7	48,3
A2	0,49	1,50	933,7	1030,6	17,3	47,6
A3	0,47	1,52	937,4	1026,0	13,3	44,5
A	0,49	1,52	933,6	1021,4	15,8	46,8
B1	0,50	1,53	724,5	850,0	23,7	47,7
B2	0,47	1,58	727,1	852,0	22,7	45,9
B3	0,50	1,48	711,5	854,2	25,0	46,1
B	0,49	1,53	721,0	852,1	23,8	46,5
C1	0,51	1,45	518,3	665,9	23,7	45,6
C2	0,51	1,47	530,0	676,8	21,0	46,0
C3	0,50	1,48	501,5	672,6	23,0	46,2
C	0,51	1,47	516,6	671,8	22,6	45,9
D1	0,50	1,36	1301,0	1358,6	13,0	41,2
D2	0,50	1,55	1314,4	1375,5	12,5	48,5
D3	0,50	1,54	1299,6	1388,7	10,5	41,2
D	0,50	1,48	1305,0	1374,3	12,0	43,6

Tab. 9-16 Směrodatná odchylka výsledků pro M-TT oceli 16 343

	Materiál	R _{p0,7}	R _m	A	Z
σ_{so}	A	3,83	12,23	2,14	2,01
	B	8,36	2,10	1,17	1,01
	C	14,32	5,46	5,40	0,31
	D	8,20	15,12	1,32	4,23



Obr. 9.7 Grafy závislosti napětí na deformaci pro ocel 16 343 M-TT, tepelná zpracování: výchozí stav A, zušlechťený stav B, C a D

9.6.3 M-TT - Videoextensometer

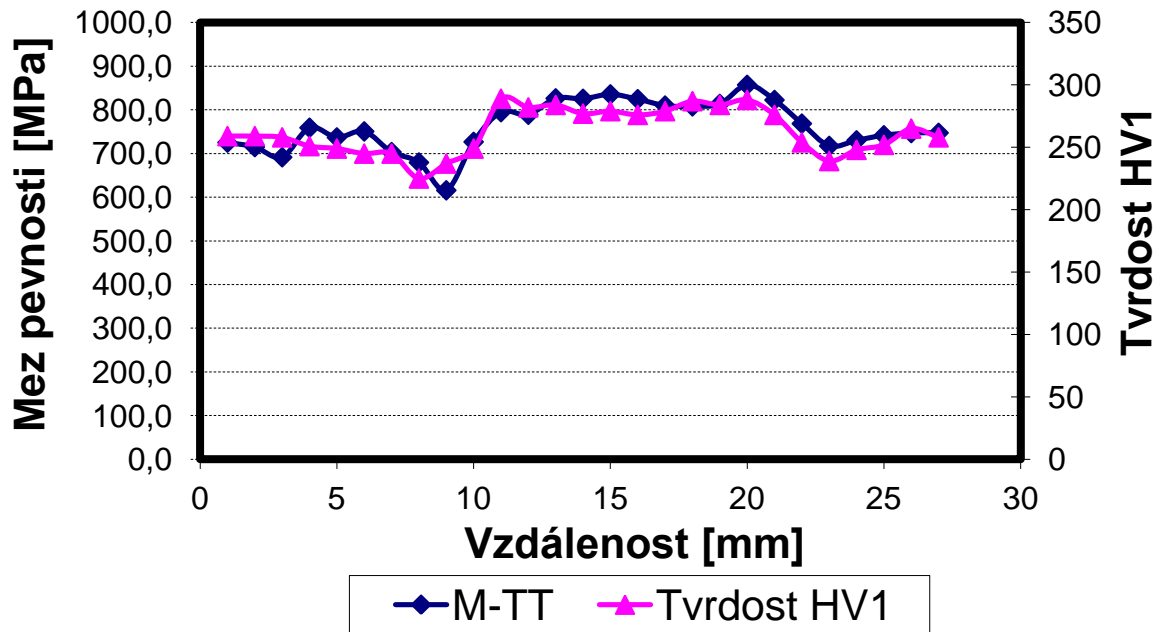
Systém umožňuje měření deformace přímo na vzorku, nevzniká zde nutnost výsledné hodnoty mechanických vlastností nikterak upravovat. Zejména hodnoty meze kluzu $R_{p0,2}$ je možné získat (oproti použití mechanického průtahoměru) přímo, a to stejným způsobem jako v případě STT.

Svarový spoj byl dodatečně zmapován vtisky tak, že každému vtisku indentoru odpovídá právě jedna hodnota od 1 až 27. Ta charakterizuje vzdálenost od místa prvního vtisku. Vzdálenost mezi jednotlivými vtisky odpovídala 1 mm. Byl tedy zmapován průběh tvrdostí o délce 27 mm, viz **Tab. 9-17**. Tvrdost nikterak nepotvrzuje správnost M-TT, je pouze jedním z možných příkladů porovnání.

Tab. 9-17 Výsledky M-TT pro svarový spoj

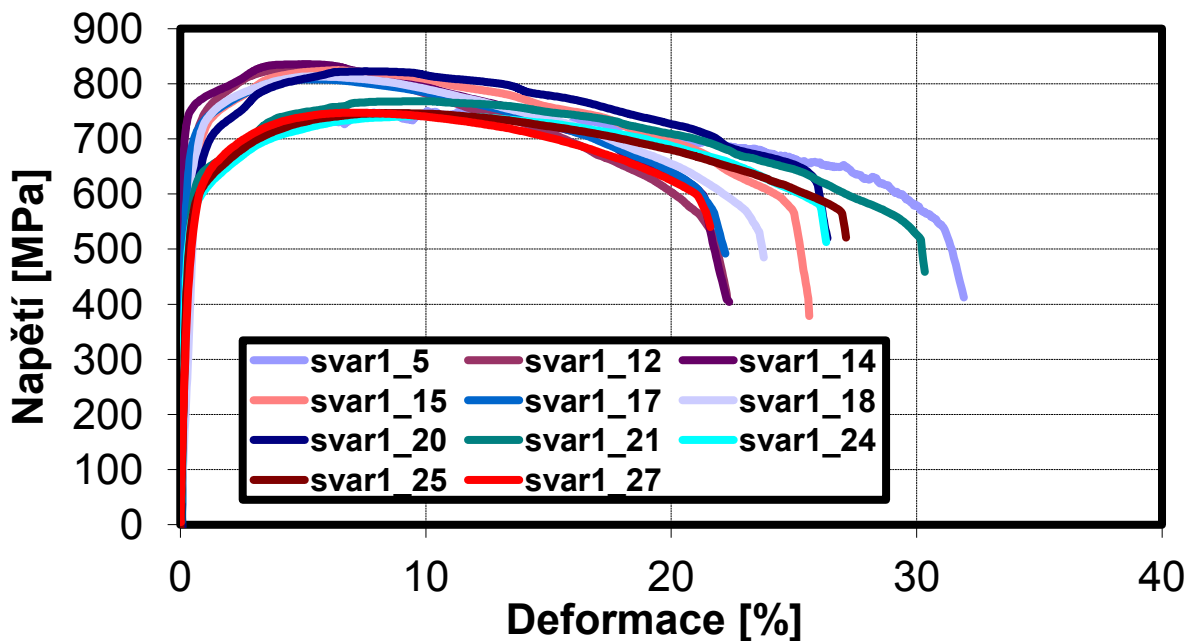
Vzorek	a_0 [mm]	b_0 [mm]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	Z [%]	Tvrdost HV 1
svar1_1	0,52	1,53	515,3	725,1	22,2	66,0	259
svar1_2	0,57	1,53	503,3	714,9	21,5	67,7	259
svar1_3	0,56	1,52	572,9	691,6	22,7	60,4	258
svar1_4	0,61	1,51	547,0	759,2	27,3	60,4	251
svar1_5	0,60	1,52	555,4	736,9	22,1	70,3	249
svar1_6	0,57	1,52	535,4	750,7	32,9	69,5	245
svar1_7	0,56	1,51	517,6	703,3	27,8	64,2	245
svar1_8	0,61	1,52	498,5	679,5	34,4	75,4	225
svar1_9	0,52	1,52	434,2	615,9	33,3	71,4	237
svar1_10	0,58	1,52	552,2	726,8	31,0	74,1	249
svar1_11	0,58	1,54	612,8	794,9	27,8	69,1	289
svar1_12	0,54	1,52	679,5	789,0	26,0	67,5	282
svar1_13	0,58	1,51	645,1	826,4	22,3	71,6	284
svar1_14	0,57	1,51	851,3	825,4	0,0	53,5	277
svar1_15	0,60	1,51	744,7	835,5	22,2	65,9	279
svar1_16	0,58	1,52	582,4	824,4	25,6	56,4	276
svar1_17	0,54	1,51	740,7	809,8	0,0	50,9	279
svar1_18	0,58	1,52	678,9	808,1	23,7	66,1	287
svar1_19	0,56	1,52	722,2	813,6	25,5	65,2	284
svar1_20	0,57	1,53	725,6	857,3	32,9	61,7	288
svar1_21	0,60	1,54	511,5	822,6	26,8	66,6	276
svar1_22	0,58	1,52	568,0	768,6	31,1	70,7	254
svar1_23	0,55	1,52	1110,3	717,6	32,9	71,3	239
svar1_24	0,56	1,53	383,7	730,2	32,5	67,5	248
svar1_25	0,56	1,52	544,4	741,8	26,1	65,3	252
svar1_26	0,58	1,53	549,9	747,0	27,0	66,2	265
svar1_27	0,53	1,53	509,5	747,4	0,0	63,0	258

Vynesením hodnot mezí pevností M-TT (**Tab. 9-17**) a průběhu tvrdostí do grafu **Obr. 9.8**, bylo možné následně stanovit závislost tvrdosti na mezi pevnosti.



Obr. 9.8 Závislost průběhu tvrdosti na mezi pevnosti

Z důvodů velkého množství vzorků v celém průběhu měření tvrdosti bylo vybráno pouze několik charakteristik napětí – deformace, které reprezentují dané oblasti svarového spoje, Obr. 9.9.



Obr. 9.9 Vybrané grafy závislosti napětí na deformaci pro svarový spoj

10. Porovnání výsledků klasických a netradičních zkoušek

10.1 Small Punch Test

Porovnání s tradičními zkušebními metodami probíhalo u vybraných mechanických vlastností jako je mez kluzu, pevnost a lomová houževnatost. Z důvodu malého množství dat, není možné porovnat výsledky přechodových teplot (T_{sp}) pro metodu SP a výsledky ze standardního měření vrubové houževnatosti (FATT) a určit z této závislosti příslušné korekční vztahy. Toto porovnání není předmětem práce.

10.1.1 SPT vs STT

Pro přímé porovnání obou metod nebylo možné použít grafických porovnání (odlišný průběh závislosti napětí na deformaci). Proto byly s použitím získaných korekčních vztahů (Tab. 9-12) dopočteny a porovnány následující mechanické hodnoty viz Tab. 10-1.

Tab. 10-1 Průměrné výsledky mezi kluzu a pevnosti pro SPT a STT

Vzorek	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]
SPT A	934,8	969,0
STT A	932,0	1032,0
SPT B	716,4	842,1
STT B	726,8	848,7
SPT C	501,1	723,0
STT C	528,4	683,6
SPT D	1306,0	1408,0
STT D	1291,9	1371,8

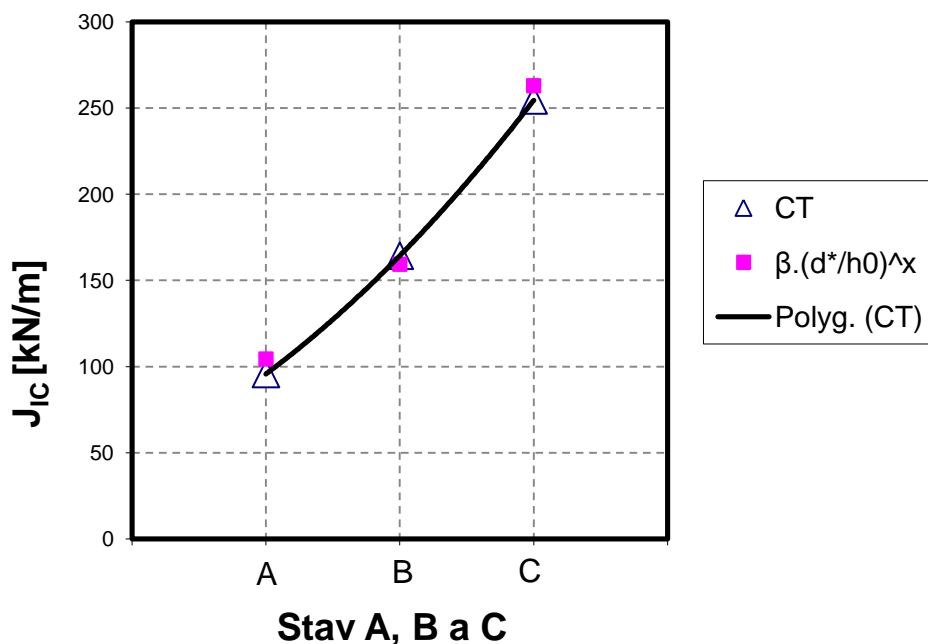
10.1.2 SPT vs Lomová houževnatost J_{IC}

Jak bylo uvedeno dříve, korelace jsou prováděny pro houževnaté materiály ($\epsilon_f > 0,25$), nikoliv pro materiály křehké ($\epsilon_f < 0,25$). Proto na základě výsledků efektivní lomové deformace (Tab. 9-13) jsou porovnávány pouze stavy A, B, a C.

Výpočtem hodnot lomové houževnatosti získaných ze vztahu (7), kde efektivní lomová deformace byla získána na základě vztahu (8), byly experimentálně stanoveny (Obr. 10.1) tyto parametry viz Tab. 10-2.

Tab. 10-2 Parametry rovnic pro stanovení efektivní lomové deformace výpočtem

Parametry rovnice	Hodnoty [-]
β	0,0520
x	2,1



Obr. 10.1 Stanovení parametrů β a X

Přímé srovnání obou metod získání efektivní lomové deformace a standardních zkoušek lomové deformace jsou v **Tab. 10-2**.

Tab. 10-3 Průměrné hodnoty výsledků lomové houževnatosti

Vzorek	J_{IC} Standard	J_{IC} (měření) SPT	J_{IC} (výpočet) SPT
A	104,4	95,0	94,8
B	159,4	199,9	179,0
C	262,9	231,9	246,9

10.1.3 SPT vs Faktor intenzity napětí K_{IC}

Dosazením hodnot napětí pro SP (**Tab. 9-13**) do vztahu (10), byla vyjádřena konstanta „C“. Průměrná hodnota konstanty je 1,461668. S touto konstantou bylo nadále možné získat, po zpětném dosazení do rovnice (11), hodnoty faktoru intenzity napětí. Ty jsou stanoveny pouze pro houževnaté materiály, a to z důvodu malého počtu zkušebních vzorků vykazujících křehký porušení, viz **Tab. 10-4**.

Tab. 10-4 Průměrné hodnoty faktoru intenzity napětí

Vzorek	K_{IC} Standard	K_{IC} SPT
A	155,5	148,3
B	202,7	215,5
C	262,4	254,6

10.2 Micro-Tensile Test

Jak již bylo zmíněno, metoda nevyžaduje pro hodnocení mechanických vlastností žádných korekčních vztahů a lze její pomocí získat mechanické hodnoty přímo. Charakter průběhu napětí - deformace mezi M-TT a STT je identický. Z těchto důvodů je možné porovnat nejen hodnoty mechanických vlastností, ale také průběhy napětí – deformace.

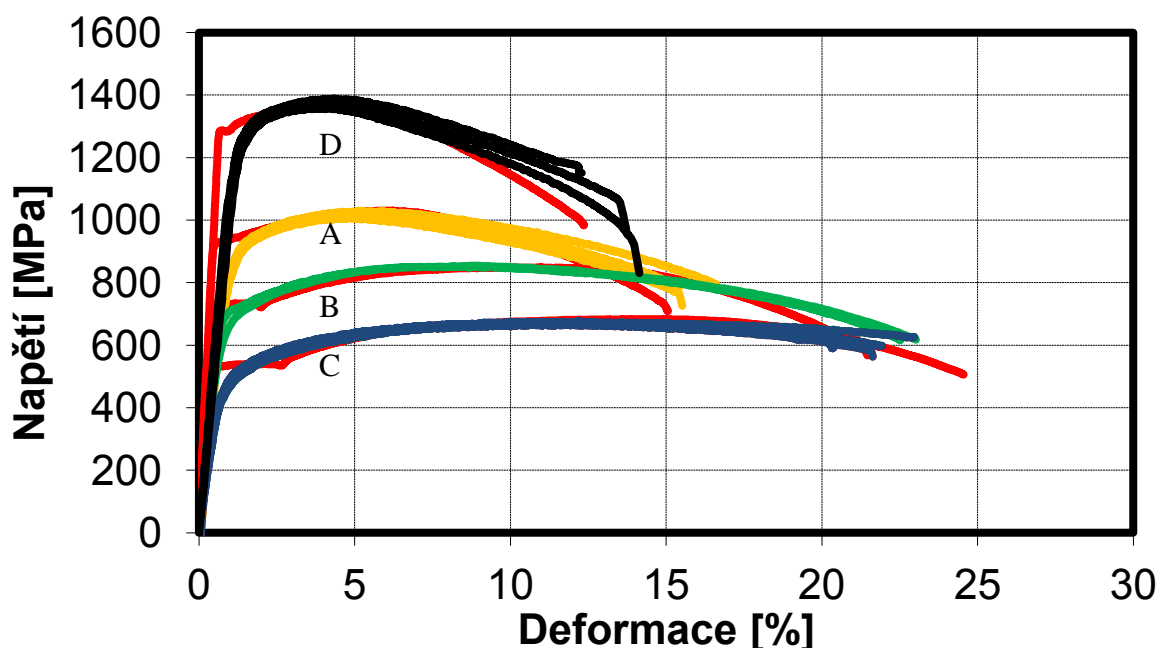
Porovnávání probíhalo pro ocel 16 343. Pro svarový spoj nebylo hlavním cílem srovnat mechanické vlastnosti se STT, ale zjistit závislost změn mechanických vlastností ve svarovém spoji. Proto byly výsledky ze STT porovnány pouze v rámci ověření (grafické) správnosti nastavení systému Videoextensometer.

10.2.1 M-TT vs STT - mechanický průtahoměr

Přímé srovnání výsledků průměrných hodnot M-TT a STT je provedeno v **Tab. 10-5**, přičemž hodnoty trvalé plastické deformace $R_{p0,7}$ jsou zde uvedeny jako ekvivalent hodnot $R_{p0,2}$ (týká se M-TT). Porovnání charakteristik napětí – deformace je provedeno na **Obr. 10.2**.

Tab. 10-5 Průměrné hodnoty mechanických vlastností pro M-TT a STT, mechanický průtahoměr

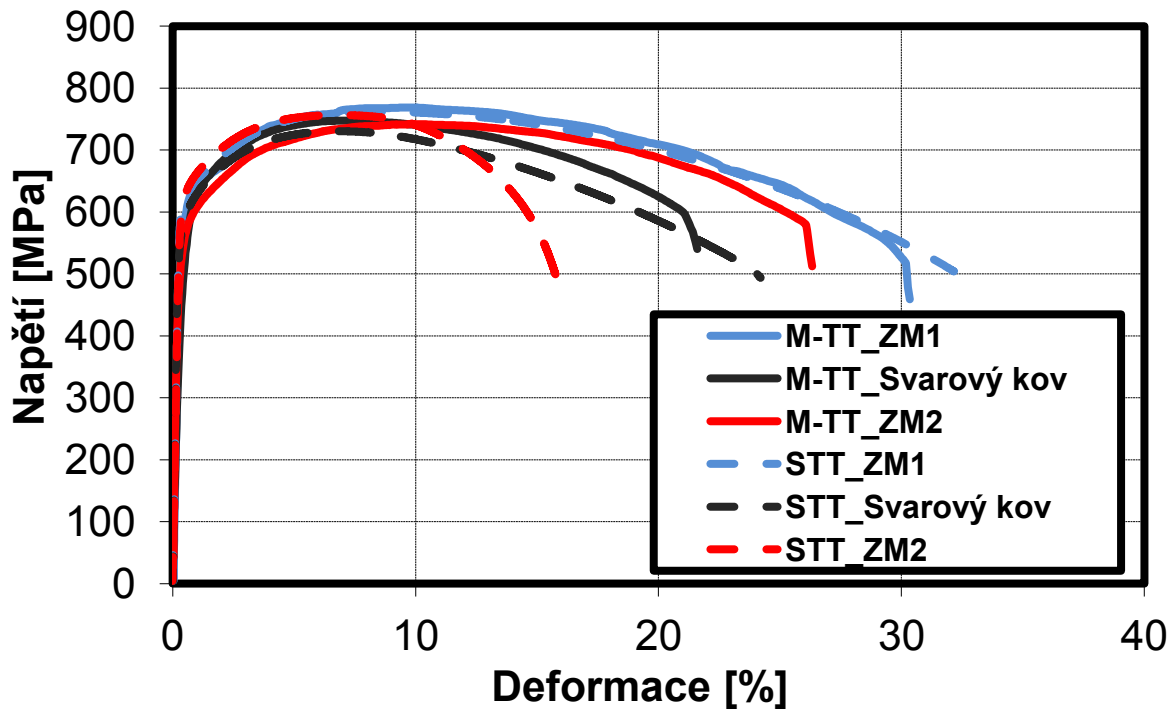
Vzorek	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	Z [%]
M-TT A	933,6	1021,4	15,8	46,8
STT A	932,0	1034,2	15,6	55,8
M-TT B	721,0	852,1	23,8	46,5
STT B	726,8	844,7	20,5	61,7
M-TT C	516,6	671,8	22,6	45,9
STT C	528,4	688,3	24,8	63,1
M- TT D	1305,0	1374,3	12,0	43,6
STT D	1291,9	1373,9	13,9	45,6



Obr. 10.2 Porovnání grafů M-TT a STT (červená), mechanický průtahoměr

10.2.2 M-TT vs STT - Videoextensometer

Přímé porovnání metody M-TT a STT je provedeno na **Obr. 10.3** a slouží pouze jako ověření správnosti nastavení systému Videoextensometer. Zde bylo použito opět reprezentativních vzorků, které charakterizovaly průměrné hodnoty mechanických vlastností daných oblastí. Odběr reprezentativního objemu materiálu pro M-TT opět odpovídal povaze a směru odběru pro STT.



Obr. 10.3 Grafy závislosti napětí na deformaci pro svarový spoj ZM1, ZM2 a svarového kovu, M-TT a STT (přerušovaná čára)

11. Diskuse výsledků

11.1 Small Punch Test

Stanovení přechodové teploty T_{SP} probíhalo na materiálech s označením Ocel 1 a 2. Snížených teplot bylo dosahováno v kryogenní komoře a lázni. V komoře z důvodů nedostatečné cirkulace chladicího média, nebylo možné docílit teplot vzorku nižších než -130 °C. To bylo pro určení přechodové teploty pro SP nedostatečné. Proto bylo použito kryogenní lázně, která byla přímo ve styku s přípravkem. Dosahované teploty až -196 °C (teplota kapalného dusíku). Z důvodu pracnosti a časové náročnosti provedení zkoušek, byly stanoveny pouze dvě přechodové teploty T_{SP} (Ocel 1 a 2). Z takto získaných bodů (závislosti T_{SP} a FATT) nebylo možné stanovit korelační koeficient. Ten by nabýval hodnot +1 a porovnání by tak postrádalo vypovídající hodnotu. Z tohoto důvodu byl stanoven koeficient přepočtu α . Ten slouží k přepočtu mezi T_{SP} a FATT a lze jej ověřit s hodnotami získaných v pracích [10, 11, 12].

V průběhu miniaturizovaných zkoušek SP za pokojových teplot, bylo možné následnou korelací stanovit hodnoty meze kluzu, pevnosti a lomové houževnatosti. Výstupní hodnoty metody SP jsou uvedeny v **Tab. 9-6**.

Stanovení nepřímých hodnot meze kluzu a pevnosti probíhalo na základě srovnání STT a metody SP. Pro porovnání se vycházelo z průměrných hodnot mezi pevnosti a kluzu ze STT. Zde se chyby měření pohybují do 1 %. Střední odchylky tedy nenabývají takových hodnot, aby byly zřetelné na **Obr. 9.5** a **Obr. 9.6**. Opak tvoří hodnoty vypočtených mezi kluzu a pevnosti metodou SP. Zde jsou odchylky mezi jednotlivými výsledky do 5 %, přičemž nejhorších výsledků dosahovaly hodnoty R_{mcal} .

Lomovou houževnatost bylo možné vyjádřit na základě hodnot J_{IC} nebo K_{IC} . Z důvodů malého množství vstupních dat (ocel 16 343, stav D) však nebylo možné získat hodnoty K_{IC} pouze pro křehké materiály ($\epsilon_f < 0,25$). Proto bylo rozhodnuto, že hodnoty K_{IC} budou vyhodnoceny alespoň pro houževnaté materiály (ocel 16 343, stav A, B, C) stejně tak, jako hodnoty J_{IC} . Pokud by nedošlo k rozdělení na křehké a houževnaté materiály, klesla by hodnota spolehlivosti lineární závislosti (mezi standardními a nestandardními metodami) až o 50 %.

11.2 Micro-Tensile Test

Mechanické vlastnosti bylo možné získat na základě upravené metodiky vůči normě ČSN EN ISO 6892-1 (vyjma kontrakce). Pro vyhodnocení kontrakce proto bylo použito několika přístupů. Cílem bylo získat přístup, který by vykazoval nejmenší odchylky od hodnot získaných ze STT a nízkou pracnost. Na těchto základech byl vybrán přístup měření, který používá nejmenších rozměrů, viz **Tab. 9-14**. V rámci zachování reprodukovatelnosti byl tento přístup použit u všech zkoušek M-TT.

Zkoušky byly provedeny pro oceli tříd 16, přičemž prvotní porovnání bylo provedeno na oceli 16 343. Zde bylo použito mechanického průtahoměru, který nebyl umístěn přímo na vzorku, ale pouze na přípravku viz **Obr. 5.3**. Tyto zkoušky zajistily prvotní porovnání s metodou STT. Výsledky vykazovaly slibný charakter průběhu napětí na deformaci a vysokou reprodukovatelnost výsledků. Výsledky, jak grafické, tak číselné, ukázaly, že při použití takto umístěného průtahoměru je nutné pro stanovení meze kluzu M-TT (odpovídající $R_{p0,2}$ STT) použít hodnot 0,7 % ($R_{p0,7}$) trvalé plastické deformace.

Systémem Videoextensometer bylo možné měřit deformaci přímo na vzorku. Odpadly tak nepřesnosti vznikající nepřímým měřením deformací. Výsledky tak nebyly zkresleny a nebylo potřeba měnit postup při vyhodnocení mechanických vlastností vůči STT. Postup vyhodnocení mechanických vlastností byl totožný se STT (vyjma měření kontrakce). Měření bylo provedeno na svarovém spoji. Zde bylo cílem poukázat na přednosti miniaturizovaných technik, proto nebylo možné porovnat veškeré výsledky z průběhu svarového spoje s STT. K porovnání došlo pouze na čistém ZM1, ZM2 a svarovém kovu. Velikosti vzorků STT neumožňovaly měřit přímo průběh mechanických vlastností ve svarovém spoji tak, jako to bylo možné s M-TT. Grafické porovnání M-TT a STT tak sloužilo pouze k ověření měření MTT se systémem Videoextensometer **Obr. 10.3**. Tyto křivky napětí – deformace byly téměř totožné s křivkami získaných STT.

12. Závěr

Tato diplomová práce se zabývá použitím netradičních metod, které využívají miniaturizovaných zkušebních vzorků pro měření mechanických vlastností konstrukčních materiálů. Sledované byly dvě zkušební metodiky SPT a M-TT. Cíle metod byly následující:

- Cílem metody SPT bylo zjistit, zda je možné stanovit obecné korelační vztahy pro výpočet meze kluzu a meze pevnosti, a to pro širší pole materiálů. Dále bylo cílem získané koeficienty porovnat s dosud publikovanými výsledky.
- Cílem metody M-TT bylo zjistit, zda je metoda schopna svým charakterem korespondovat s výsledky ze STT, a to s minimálními odchylkami od postupu testování, vyhodnocování výsledků a výroby vzorků.

Korelační vztahy pro stanovení meze kluzu a meze pevnosti metodou SPT byly stanoveny na základě rozdělení na křehký a houževnatý materiál. Jako houževnaté byly považovány ty materiály, které vykazovaly hodnotu efektivní lomové deformace větší než 0,25. Pro tyto materiály byl stanoven korelační koeficient pro mez kluzu +0,999 a pro mez pevnosti +0,987. To značí, že jsou porovnávané vztahy na sobě zcela lineárně závislé. Pro mez kluzu byly stanoveny parametry přímky $\beta = 0,4968$ a $C = 156,53$ a pro mez pevnosti $\beta = 0,2974$ a $C = 164,64$. Největšího rozptylu nabývaly výsledky meze pevnosti, ty byly s největší pravděpodobností ovlivněny chybami při měření tloušťky zkušebního disku h_0 .

Výsledné koeficienty α , které slouží k přepočtu mezi T_{SP} a FATT, byly v souladu s výsledky prací [10, 11, 12] a nabývaly tak hodnot v rozmezí 0,3 až 0,55. Hodnota zjištěného koeficientu α zkoumaného materiálu byla 0,38, respektive 0,46. Z důvodů malého množství zkušebního materiálu a pracnosti metody, nebylo možné stanovit příslušné korelační vztahy přímým porovnáním hodnot T_{SP} a FATT.

Hodnoty lomová houževnatosti byly stanoveny pouze pro houževnaté materiály, a to z důvodů výše uvedených. Hodnoty J_{IC} stanovené metodou SPT se od výsledků standardních zkoušek lišily o max. 11 % v případě výpočtu efektivní lomové deformace ϵ_f . Vhodnější metodou stanovení ϵ_f je tedy metoda početní, která vyniká vyšší přesností a nižší pracností. Výsledky lomové houževnatosti vyjádřené faktorem intenzity napětí K_{IC} pro SPT se lišily od výsledků standardních zkoušek o max. 6 %.

Z důvodů použití úzkého pole ocelových materiálů není zřejmé, zda byly získány obecné korelační vztahy. Nicméně bylo ověřeno, že je možné tyto vztahy uplatnit pro širší pole ocelových materiálů. Podmínkou je rozeznávat materiály křehké a houževnaté. Přechod mezi těmito stavy je vyjádřen hodnotou efektivní lomové deformace 0,25.

V případě zkoušek M-TT byla prvním krokem stanovení vhodné geometrie vzorku. Návrh byl proveden s využitím MKP výpočtů. Rozměry těla vzorku byly šířka 1,5, délka 2,6 a přechodový radius 0,2 mm.

Dalším krokem byl návrh odpovídajících upevňovacích čelistí pro M-TT vzorky. Navržené čelisti umožnily přenos sil mezi zkušebním zařízením a vzorkem pomocí kombinace silového a tvarového styku.

Nepřímé měření deformace v průběhu zkoušky způsobilo v průměru pokles hodnot Youngova modulu o 50 %. Z tohoto důvodu bylo nutné pro určení meze kluzu $R_{p0,2}$ vycházet z vyšších hodnot trvalé plastické deformace. Tomuto nejvíce odpovídala hodnota trvalé plastické deformace 0,7 %. Nejlepších výsledků bylo dosaženo přímým měřením deformace na zkušebním vzorku systémem Videoextensometer. Zde bylo možné získat mechanické hodnoty přímo, a to bez jakéhokoliv přepočtu a odchylek od postupu při vyhodnocení STT. Měřením deformace přímo na vzorku bylo docíleno téměř totožných křivek napětí – deformace se STT.

Reprodukovatelnost výsledků M-TT se pohybovala do 3 %. Výsledky mechanických hodnot vykazovaly odchylku od výsledků STT do 6 %, kromě hodnot kontrakcí. Ty vykazovaly v některých případech odchylku 20 % a více. Z tohoto důvodu bylo stanoveno postupu, který by snížil tyto odchylky. Zvolením jednotného postupu, který byl použit pro hodnocení veškerých kontrakcí, bylo docíleno snížením odchylek na hodnoty do 10 %. Větších odchylek bylo dosahováno v případech, kdy byl materiál poškozen nesouměrně a to vlivem necelistvostí v materiálu. Tyto necelistvosti měly velký vliv (malé rozměry vzorku) na výsledné hodnoty kontrakcí.

Lze říci, že metoda M-TT nemusí být jen doplňkovou metodou STT, ale může ji v některých případech i předčit. Těmito případy jsou např. hodnocení svarových spojů, hodnocení povlaků, tenkých trub a plechů.

Obecnou nevýhodou těchto semi-destruktivních metod je právě jejich miniaturní objem, který ve všech případech nemusí dostatečně reprezentovat danou zkušební oblast. Nelze jich tedy použít tam, kde by vady nabývaly rozměrů, které by ovlivňovaly výsledky mechanických zkoušek.

Práce však prokázala, že tyto metody využívající miniaturních zkušebních objemů umožňují efektivní hodnocení mechanických vlastností. Jejich uplatnění je zejména tam, kde je z jakéhokoliv důvodu požadován nedestruktivní odběr či existuje-li požadavek na snížení spotřeby zkušebního materiálu.

13. Seznam obrázků

Obr. 4.1	Model sestavy přípravku SPT	10
Obr. 4.2	Schéma geometrických parametrů pro metodu Small Punch Test [4]	11
Obr. 4.3	Typický záznam závislosti zátěžné síly na posuvu pro metodu SPT	13
Obr. 4.4	Graf závislosti zátěžné síly (Y) na posuvu (X)	14
Obr. 4.5	Měření místa v oblasti porušení h_f [6]	15
Obr. 4.6	Stanovení přechodové teploty metodou SPT [5]	17
Obr. 4.7	Zkušební vzorek M-TT	18
Obr. 4.8	Série snímků z průběhu zkoušky M-TT [6]	18
Obr. 5.1	Odběr zkušebního materiálu a možné geometrie zkušebních vzorků [11]	19
Obr. 5.2	Scoop Sampling [12]	20
Obr. 5.3	Průtahoměr umístěný na přípravku pro SPT [6]	21
Obr. 5.4	Závislost vzdálenosti kamery od vzorku a velikosti zorného pole [16]	22
Obr. 5.5	Schéma rozmístění kamery systému Videoextensometer [16]	22
Obr. 5.6	Modulace v důsledku špatně připravených značek (kolmost značek vůči hlavní ose napětí) [16]	24
Obr. 5.7	Umístění značek vůči matici CCD kamery [16]	25
Obr. 5.8	Schéma principu měření deformací laserem [17]	26
Obr. 5.9	Průběh deformace, ARAMIS [18]	27
Obr. 5.10	Hardwarové vybavení systému ARAMIS [18]	27
Obr. 8.1	Kryogenní komora do $-130\text{ }^\circ\text{C}$	32
Obr. 8.2	Umístění komory na zkušebním zařízení	32
Obr. 8.3	Průběh vyrovnávacích teplot pro kryogenní pec	32
Obr. 8.4	Umístění přípravku přímo v lázni	33
Obr. 8.5	Měření teploty během testu, $\pm 3\text{ }^\circ\text{C}$	33
Obr. 8.6	Stanovení lomové energie pro metodu SPT, výpočet plochy pod křivkou	34
Obr. 8.7	Vyhodnocení síly F_e ze závislosti síla – posuv příčnicku	35
Obr. 8.8	Umístění SP vzorku před zalitím do Dentakrylu	36
Obr. 8.9	Vybroušený vzorek je připraven pro měření h_f	36
Obr. 8.10	Měření nejvyššího místa h_f	36
Obr. 8.11	Zkušební zařízení MTS	37
Obr. 8.12	Analýza geometrie vzorku pro konečný návrh (0,2:2,6:1:1,5), maximální napětí ..	38
Obr. 8.13	Schéma výroby drážky kotoučovou frézou, sousledné frézování	39
Obr. 8.14	Přípravky pro zkoušky M-TT, (nalevo) jsou zobrazeny ploché čelisti zajišťující přenos sil pouze tvarovým stykem, (napravo) přenos sil je uskutečněn kombinací silového a tvarového styku	40

Obr. 8.15 Umístění mechanického průtahoměru na čelistech.....	41
Obr. 8.16 Vyhodnocení meze kluzu pro M-TT, $R_{p0,7}$	41
Obr. 8.17 Rozmístění vzorků M-TT v materiálu.....	42
Obr. 8.18 Naleptaný svarový spoj oceli třídy 16 s viditelným U svarem a TOO	43
Obr. 8.19 Měření příčného zúžení, měření nejmenších rozměrů šířky a tloušťky vzorku.....	44
Obr. 8.20 Metoda přímého měření obsahu lomové plochy.....	45
Obr. 8.21 Metoda zjednodušeného výpočtu	46
Obr. 9.1 Grafy STT oceli 16 343 ve 4 stavech TZ.....	49
Obr. 9.2 Grafy závislosti napětí na deformaci pro svarový spoj.....	50
Obr. 9.3 Stanovení T_{SP} ze závislosti energie - teplota, Ocel 1	52
Obr. 9.4 Stanovení T_{SP} ze závislosti energie - teplota, Ocel 2	53
Obr. 9.5 Korelace mezi kluzu dle metod SPT a STT	55
Obr. 9.6 Korelace mezi pevnosti dle metod SPT a STT	55
Obr. 9.7 Grafy závislosti napětí na deformaci pro ocel 16 343 M-TT, tepelná zpracování: výchozí stav A, zušlechťený stav B, C a D.....	59
Obr. 9.8 Závislost průběhu tvrdosti na mezi pevnosti.....	61
Obr. 9.9 Vybrané grafy závislosti napětí na deformaci pro svarový spoj	61
Obr. 10.1 Stanovení parametrů β a X	63
Obr. 10.2 Porovnání grafů M-TT a STT (červená), mechanický průtahoměr	64
Obr. 10.3 Grafy závislosti napětí na deformaci pro svarový spoj ZM1, ZM2 a svarového kovu, M-TT a STT (přerušovaná čára)	65

14. Seznam tabulek

Tab. 5-1 Rozlišovací schopnost závislá na velikosti zorného pole [16].....	23
Tab. 7-1 Tepelné zpracování oceli 16 343	30
Tab. 8-1 Výsledky měření metodou minimálních rozměrů plochy S_{min}	44
Tab. 8-2 Výsledky přímého měření obsahu lomové plochy S_{min}	45
Tab. 8-3 Výsledky metody zjednodušených výpočtů S_{min}	47
Tab. 9-1 Výsledky STT pro ocel 16 343	48
Tab. 9-2 Směrodatná odchylka výsledků pro STT oceli 16 343	49
Tab. 9-3 Výsledky STT pro ZM1	50
Tab. 9-4 Výsledky STT pro ocel ZM2	50
Tab. 9-5 Výsledky STT pro svarový kov	50
Tab. 9-6 Výsledky metody SPT pro materiál 16 343	51
Tab. 9-7 Hodnoty energií pro Ocel 1	52
Tab. 9-8 Hodnoty energií pro Ocel 2.....	52
Tab. 9-9 Výsledné hodnoty koeficientů α	53
Tab. 9-10 Výsledky $R_{p0,2calc}$	54
Tab. 9-11 Výsledky R_{mcalc}	54
Tab. 9-12 Experimentálně stanovené parametry pro přepočítání meze kluzu a meze pevnosti mezi SPT a STT	55
Tab. 9-13 Hodnoty efektivní lomové deformace a napětí pro SP pro ocel 16 343	56
Tab. 9-14 Výsledky jednotlivých metod výpočtu kontrakcí Z	57
Tab. 9-15 Výsledky M-TT pro ocel 16 343.....	58
Tab. 9-16 Směrodatná odchylka výsledků pro M-TT oceli 16 343.....	58
Tab. 9-17 Výsledky M-TT pro svarový spoj	60
Tab. 10-1 Průměrné výsledky meze kluzu a meze pevnosti pro SPT a STT.....	62
Tab. 10-2 Parametry rovnic pro stanovení efektivní lomové deformace výpočtem	62
Tab. 10-3 Průměrné hodnoty výsledků lomové houževnatosti	63
Tab. 10-4 Průměrné hodnoty faktoru intenzity napětí.....	63
Tab. 10-5 Průměrné hodnoty mechanických vlastností pro M-TT a STT, mechanický průtahoměr	64

15. Literatura

- [1] Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity, online:
http://www.sci.muni.cz/chemsekcce/c8870/pdf/Uloha12_mechan_vl.pdf, cit. 1.5.2013
- [2] SKÁLOVÁ J., KOVAŘÍK R., BENEDIKT V., 2005: Základní zkoušky kovových materiálů. Západočeská univerzita, Plzeň.
- [3] PTÁČEK L., 2001: Nauka o materiálu I a II. CERM, Brno.
- [4] Code of Practice Small Punch Test Metod for Metallic Materials. CEN WORKSHOP AGREEMENT CWA 15627, December 2007, online:
http://www.phillipsfamilyworld.co.uk/Phoenix/Solidworks/disc_creep_machine/European%20code%20of%20practice%20CWA%2015627.pdf, cit. 20.4.2013
- [5] Materiálový a metalurgický výzkum s.r.o., online:
http://www.mmvyzkum.cz/Obr/1_The%20European%20Code.....pdf, cit. 20.4.2013
- [6] KONOPÍK, P., DŽUGAN, J.: Determination of Tensile Properties of Low Carbon Steel and Alloyed Steel 34CRNiMo6 by Small Punch Test and Micro-Tensile Test, The second International Conference SSTT, Small Punch Test and Other Miniature Tests, October 2nd - 4th, 2012, Ostrava, Czech Republic
- [7] ABENDROTH, M., KUNA, M.: Identification of ductile damage and fracture parameters from the small punch test using neural network, The first Conference on Small Punch Test and Other Miniature Tests, August 31st - 2nd September, 2010, Ostrava, Czech Republic
- [8] Yingzhi Li, Rijk van Vulpen: Comparison with Fracture Toughness Derived from Charpy-V and Small Punch Test, The second International Conference SSTT, Small Punch Test and Other Miniature Tests, October 2nd - 4th, 2012, Ostrava, Czech Republic
- [9] MATOCHA, K., FILIP, M.: Results of Round Bobin Test for Determination of T_{SP} of P22 Steel by Small Punch Test, The second International Conference SSTT, Small Punch Test and Other Miniature Tests, October 2nd - 4th, 2012, Ostrava, Czech Republic
- [10] TURBA, K., HURST, R., HAHNER, P.: Small Punch Fracture Testing Applied to the NESC-1 Spinning Cylinder Material, The second International Conference SSTT, Small Punch Test and Other Miniature Tests, October 2nd - 4th, 2012, Ostrava, Czech Republic
- [11] CHAN, K., SHIBLI, A., FERNANDES, J., SMITH, C.: Experience with Electrical Discharge Sampling Equipment (EDSE) in Sample Removal for Miniature Specimen Testing and Material Quality Checks, The second International Conference SSTT, Small Punch Test and Other Miniature Tests, October 2nd - 4th, 2012, Ostrava, Czech Republic
- [12] Rolls-Royce, online: http://www.rolls-royce.com/Images/Scoop%20Sampling_tcm92-25545.pdf, cit. 11.4.2013
- [13] Zwick Roell, online: <http://www.zwick.de/cs/produkty/snimace-drahy.html>, cit. 30.4.2013
- [14] Instron, online:
http://www.instron.com/wa/acc_catalog/prod_list.aspx?cid=441&cname=Crack%20Opening%20Displacement%20%28COD%29%20Gauges#products, cit. 1.5.2013
- [15] MTS Services, online:
http://www.mts.com/ucm/groups/public/documents/library/dev_003828.pdf, cit. 29.4.2013
- [16] Manual of Videoextensometer NG, online:
<ftp://ftp.sp.se/Public/234%20WinextNG%20e.pdf>, cit. 1.5.2013

[17] United Calibration Corporation, online:

http://www.tensiletest.com/info_downloads/dwnlds/INSTRUMENTATIONS.PDF, cit.
23.3.2013

[18] Spectromas, online: http://www.spectromas.ro/assets/1276243727_ARAMIS_EN.pdf,
cit. 25.4.2013

[19] Pixel-fox, online: <http://www.pixel-fox.com/>, cit. 30.3.2013