

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: **Doktorský studijní program P 2301**
Studijní obor: **Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie - 3911V016**

DISERTAČNÍ PRÁCE k získání akademického titulu doktor

KOMPATIBILITA VÝSLEDKŮ HODNOCENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ

Autor: **Ing. Pavel Konopík**
Školitel: **doc. Ing. Ján Džugan Ph.D**

Plzeň, 2014

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat všem, kteří mi umožnili na této práci pracovat a různými způsoby mě podporovali. Jedná se především o mého školitele doc. Ing. Jána Džugana, Ph.D., který mě zasvětil do tajů mechanického zkoušení, zejména zkoušení lomové houževnatosti a hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních těles. Dále děkuji firmě COMTES FHT a.s., která mně umožnila měřit veškerá potřebná data ve svých laboratořích. Část mé práce vznikla v laboratořích výzkumného institutu Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, kde se mě s velkou vřelostí ujal Dr. Hans-Werner Viehrig, kterému tímto srdečně děkuji. V neposlední řadě můj dík patří všem mým blízkým, předně rodičům a také mé manželce, která mě od začátku plně podporovala a motivovala tuto práci dokončit.

Anotace

Tato práce se zabývá určováním empirických korelačních vztahů mezi mechanickými charakteristikami získaných pomocí standardních mechanických zkoušek a pomocí zkušebních technik, umožňujících získat charakteristické mechanické vlastnosti konstrukčních materiálů za pomoci malého objemu zkušebního materiálu. Jedná se především o zkoušky Small Punch Test (SPT), Mikro-tahové testy (M-TT) a zkoušky rázem v ohybu s použitím mini-Charpy těles. Pomocí těchto zkušebních metod lze měřit aktuální mechanické vlastnosti za účelem odhadu zbytkové životnosti, např. provozovaných komponent (zejména v energetickém odvětví). Díky velmi malým rozměrům lze měřit lokální vlastnosti materiálů z míst, která jsou pro porušení součástí kritická, např. přechodové oblasti u svarových spojů. Další uplatnění těchto metod je všude tam, kde je akutní nedostatek experimentálního materiálu – zkoušky malých součástí nebo vzorků po termofyzikální simulaci.

Rešeršní část se zabývá zkouškami tahem, rázem v ohybu, lomové houževnatosti a technikami zkoušení miniaturních těles (SPT, M-TT a testy na mini-Charpy tělesech). V krátkosti je vysvětlena jejich důležitost a historické pozadí těchto zkoušek. Účelem teoretické části je popsat tyto zkoušky s důrazem na měření hodnot, které budou vůči sobě korelovány.

Pro splnění cíle práce bylo v experimentální části naměřeno velké portfolio zkušebních těles pro 19 materiálů a je diskutována oblast použitelnosti technik umožňující získat charakteristické mechanické vlastnosti za pomoci malého objemu zkušebního materiálu.

Klíčová slova: Zkouška tahem, zkouška rázem v ohybu, lomová mechanika, Small Puch test, Mikro-tahové testy, mechanické vlastnosti

Annotation

This thesis deals with the determination of empirical correlations between mechanical characteristics obtained using standard mechanical testing and miniature testing techniques. Miniature testing techniques enable to measure the characteristic mechanical properties of structure materials using a small amount of experimental material. These testing techniques include mainly Small Punch Test (SPT), Micro-Tensile test and mini-Charpy impact test. They enable to measure current mechanical properties in order to estimate the residual service life, e.g. as regards components in service (especially in the power industry). Due to small dimensions, local characteristics of material can be measured from locations which are critical for the damage of components, e. g. heat affected zones in weld joints. These methods are also used in the cases when there is a lack of experimental material – the tests of small components or samples after thermo-physical simulation.

The theoretical part deals with the tensile test, Charpy impact test, fracture toughness test and miniature testing techniques (SPT, M-TT and mini-Charpy test). The importance and historical background of these tests are briefly explained. The objective of the theoretical part is to describe these types of tests focusing on the characteristic values which will be correlated.

To achieve this objective, a large scope of specimens was measured for nineteen materials in the experimental part. Consequently, the applicability of the techniques enabling to determine characteristic mechanical properties using a small amount of experimental material is discussed.

Key words: Tensile test, Charpy impact test, fracture mechanics, Small Punch Test, Micro-Tensile test, mechanical properties

Obsah:

1. ÚVOD	10
2. ZKOUŠKA TAHEM	14
2.1. ZKUŠEBNÍ TYČE	14
2.1.1. Poměrná zkušební tělesa	14
2.1.2. Nepoměrná zkušební tělesa	14
2.2. Základní typy tahových diagramů	14
2.3. Vyhodnocení základních charakteristik	15
2.3.1. Mez pevnosti	16
2.3.2. Mez kluzu	16
2.3.3. Tažnost	17
2.3.4. Kontrakce (zúžení)	17
3. ZKOUŠKA RÁZEM V OHYBU METODOU CHARPY	18
3.1. Podstata zkoušky	18
3.2. Vliv šířky zkušební tyče	20
3.3. Vyhodnocení přechodové teploty	21
3.4. Instrumentovaná zkušební metoda	22
4. LOMOVÁ MECHANIKA	24
4.1. Historické pozadí vzniku lomové mechaniky	24
4.2. Rozdělení lomové mechaniky	25
4.2.1. Lineární elastická lomová mechanika (LELM).....	25
4.2.2. Elasticko-plastická lomová mechanika (EPLM).....	27
4.3. Součinitel intenzity napětí	28
4.3.1. Vliv rozměrů zkušebního tělesa	30
4.4. J-Integrál	31
4.5. Zkoušky lomové houževnatosti	32
4.5.1. Měření lomové houževnatosti K_{IC} ve stavu rovinné deformace	34
4.5.2. Stanovení hodnoty lomové houževnatosti J_{IC}	36
4.5.2.1 Stanovení J_{IC} na několika zkušebních tělesech	36
4.5.2.2 Stanovení J_{IC} na jednom zkušebním tělese	38
5. ZKOUŠKY MINIATURNÍCH TĚLES	40
5.1. Odběr materiálu z provozovaných komponent zařízení	40
5.2. Small Punch Test	42
5.2.1. Vznik metody Small Punch Testu	42
5.2.2. Výhody a nevýhody SPT	43
5.2.3. Princip a postup zkoušení.....	43
5.2.3.1 Výroba zkušebních těles.....	44

5.2.3.2	Postup zkoušení	45
5.2.4.	Vyhodnocení zkoušky SPT	46
5.2.4.1	Vyhodnocení přechodu z lineárního stavu do plastického stavu	46
5.2.4.2	Vyhodnocení lomové energie při SPT	48
5.2.4.3	Vyhodnocení efektivní lomové deformace	48
5.2.5.	Stanovení meze pevnosti a meze kluzu na základě výsledků SPT	49
5.2.6.	Určení přechodové teploty na základě výsledků SPT	51
5.2.7.	Určení lomové houževnatosti na základě výsledků SPT	52
5.2.7.1	Určení lomové houževnatosti pro materiály s tvárným porušením	53
5.2.7.2	Určení lomové houževnatosti pro materiály s křehkým porušením	53
5.3.	Mikro-tahové testy (M-TT)	53
6.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	55
6.1.	Experimentální materiál	55
6.1.1.	Materiál s mikrostrukturou m1 a m2	56
6.1.2.	Materiál s mikrostrukturou m3, m4 a m5	56
6.1.3.	Materiál s mikrostrukturou m6	56
6.1.4.	Materiál s mikrostrukturou m7	56
6.1.5.	Materiál s mikrostrukturou m8 – m13	57
6.1.6.	Materiál s mikrostrukturou m14 – m18	57
6.1.7.	Materiál s mikrostrukturou m19	57
6.2.	Zkouška tahem	58
6.3.	Zkouška rázem v ohybu	62
6.3.1.	Provedení zkoušek	62
6.3.2.	Výsledky zkoušek při pokojové teplotě	62
6.3.3.	Výsledky měření přechodové teploty FATT ₅₀	68
6.3.4.	Diskuze výsledků zkoušek rázem v ohybu	75
6.3.4.1	Zkoušky rázem v ohybu při 20°C	75
6.3.4.2	Měření přechodových teplot FATT ₅₀	80
6.4.	Zkoušky lomové houževnatosti	81
6.4.1.	Provedení zkoušek	81
6.4.2.	Provedení zkoušek metodou více těles	82
6.4.3.	Provedení zkoušek metodou měření jednoho tělesa	88
6.4.4.	Shrnutí výsledků lomové houževnatosti vyhodnocené dle normy ASTM E 1820 ...	94
6.4.5.	Vyhodnocení lomové houževnatosti materiálu m19 dle normy ISO 12135	94
6.5.	Zkoušky Small Punch Test (SPT)	96
6.5.1.	Vývoj softwaru pro vyhodnocení SPT	98
6.5.2.	Výsledky zkoušek SPT při pokojové teplotě	99
6.5.3.	Měření a vyhodnocení přechodové teploty pomocí SPT	106
6.6.	Určení korelačních vztahů mezi výsledky SPT a standardních zkoušek	109

6.6.1.	Vyhodnocení tahových vlastností na základě zkoušek SPT	109
6.6.2.	Vyhodnocení přechodové teploty na základě zkoušek SPT	113
6.6.3.	Vyhodnocení lomové houževnatosti na základě zkoušek SPT	113
6.7.	Mikro-tahové testy (M-TT)	116
6.7.1.	Návrh zkušebního tělesa a princip zkoušky M-TT	116
6.7.2.	Princip a první provedení M-TT	117
6.7.3.	Měření deformace M-TT pomocí optických metod	121
6.7.4.	Oblasti použití M-TT	122
7.	DISKUZE VÝSLEDKŮ	124
8.	ZÁVĚR	127
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:	129
	SEZNAM OBRÁZKŮ	133
	SEZNAM TABULEK	136
	SEZNAM PUBLIKACÍ	137

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

BM	Base material (základní materiál)	
COD	Crack Opening Displacement	
CT	Compact tension specimen (těleso používané při zkouškách LH zatížené excentrickým tahem)	
CTOD	Crack Tip Opening Displacement	
DBTT_{full size}	Ductile-brittle transition temperature for Charpy specimen 10x10x55 mm (přechodová teplota pro Charpy těleso 10x10x55 mm)	
DBTT_{typex}	Ductile-brittle transition temperature for sub-size Charpy specimen (přechodová teplota měřená na podrozměrném Charpy tělese)	
DIC	Digital Image Correlation (Digitální obrazová korelace)	
EPLM	Elasto-plastická lomová mechanika	
FATT₅₀	Fracture Appearance Transition Temperature (Přechodová teplota vyhodnocená na základě 50 % podílu křehkého (štěpného) a houževnatého (tvárného) lomu)	
LELM	Lineární elastická lomová mechanika	
LH	Lomová houževnatost	
MKP	Metoda konečných prvků	
MS	Multiple specimen method – metoda měření J-R křivky na více tělesech	
M-TT	Micro-Tensile tests (Mikro-tahové testy)	
RD	Rovinná deformace	
RN	Rovinná napjatost	
SE(B)	Single-edge bend specimen (těleso používané při zkouškách LH zatížené tříbodovým ohybem)	
SEM	Scanning electron microscope	
SPT	Small Punch Test	
UC	Unloading compliance method- metoda měření J-R křivky na jednom tělese pomocí měření změny poddajnosti	
A	Tažnost	[%]
a, a_i	Délka trhliny v tělese	[mm]
a₀	Počáteční délka trhliny	[mm]
a_{0q}	Počáteční délka trhliny určená procedurou dle ASTM E1820	[mm]
a_f	Konečná délka trhliny	[mm]
A_F	Práce vnějších sil	[J]
a_p	Fyzická délka trhliny	[mm]
A_{pl}	Plastická energie (plocha pod křivkou síla – posunutí)	[J]
B	Šířka (tloušťka) zkušební tělesa	[mm]
b₀, b_i	Ligament (W-a ₀ ; W-a _i)	[mm]
BF	Podíl křehkého lomu	[%]
B_N	Šířka (tloušťka) zkušební tělesa s bočními vruby	[mm]
C	Poddajnost	m.N ⁻¹
C₁, C₂	Regresní konstanty J-R křivky	[-]
C_{SP}	Empiricky určená konstanta	[-]
E	Youngův modul pružnosti v tahu	[MPa]

E^{SP}	Lomová energie získaná z plochy pod křivkou až do porušení disku při SPT	[J]
F	Síla	[N]
F_a	Velikost síly při zastavení trhliny	[kN]
F_e	Síla charakterizující přechod z lineárního stavu do stádia spojovaného s rozvojem plastické deformace přes tloušťku disku při SPT	[N]
F_{gy}	Síla na mezi makroplastických deformací	[kN]
F_{iu}	Velikost síly při inicializaci trhliny	[kN]
F_m	Maximální síla zaznamenaná během testu SPT	[N]
F_{max}	Maximální síla dosažená při zkoušce tahem	[N]
F_Q	Síla měřená při zkouškách lomové houževnatosti definovaná jako průsečík 5% sečny nebo max. síla při prasknutí zkušebního tělesa	[kN]
G	Rychlost uvolňování energie, hnací síla trhliny	[N/m]
H	Výška zkušebního Charpy tělesa	[mm]
h₀	Počáteční tloušťka SPT disku	[mm]
h_f	Tloušťka disku po zkoušce SPT v těsné blízkosti trhliny (nejúžší předpokládané místo po zkoušce SPT)	[mm]
J	J-integrál	[kN/m]
J_{0.2BL}	Lomová houževnatost určená z J-integrálu (ISO 12135)	[kN/m]
J_{0.2BL(B)}	Velikostně závislá hodnota lomové houževnatosti určená z J-integrálu (ISO 12135)	[kN/m]
J_{el}	Elastická část J-integrálu	[kN/m]
J_{IC}	Lomová houževnatost určená z J-integrálu (ASTM E1820)	[kN/m]
J_{max} a J_{limit}	Limity pro stanovení LH dle ASTM E1820 a ISO 12135	[kN/m]
J_{pl}	Plastická část J-integrálu	[kN/m]
J_Q	Provizorní hodnota lomové houževnatosti určená z J-integrálu (ASTM E1820)	[kN/m]
k	Regresní koeficient J-R křivky	[mm]
K	Součinitel intenzity napětí	[MPa.m ^{0.5}]
K_C	Kritická hodnota součinitele intenzity napětí v okamžiku lomu	[MPa.m ^{0.5}]
K_{CU}	Vrubová houževnatost měřená na Charpy tělese s U-vrubem	[J/cm ²]
K_{CV}	Vrubová houževnatost měřená na Charpy tělese s V-vrubem	[J/cm ²]
K_{CH}	Experimentální konstanta pro vyhodnocení BF ze záznamu při zkouškách rázem v ohybu na Charpy tělesech	[-]
K_{IC}	Lomová houževnatost určená za podmínek RD	[MPa.m ^{0.5}]
K_{JIC}	Lomová houževnatost vypočtená z J _{IC}	[MPa.m ^{0.5}]
k_p	Součinitel proporcionality	[-]
K_Q	Provizorní hodnota lomové houževnatosti	[MPa.m ^{0.5}]
k_{SP}, J₀, C_{SP}	Konstanty pro vyhodnocení lomové houževnatosti ze SPT	[-]
KV (KU)	Nárazová práce-těleso s V-rubem (U-vrubem)	[J]
L₀	Počáteční měřená délka	[mm]
L_e	Počáteční měřená délka průtahoměru	[mm]
L_U	Konečná měřená délka	[mm]
M	Koeficient pro výpočet sklonu čáry otupení	[-]
R	Odpor materiálu proti šíření trhliny (charakterizuje LH materiálu)	[J/m ²]
R_c	Asymetrie únavového cyklu	[-]
R_e, R_p	Výrazná/smluvní mez kluzu	[MPa]
R_{eH}	Výrazná horní mez kluzu	[MPa]
R_{eL}	Výrazná dolní mez kluzu	[MPa]

R_m	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
R_{p0,2}	Smluvní mez kluzu při plastické deformaci 0,2%	[MPa]
S₀	Počáteční průřez zkušební tyče při zkoušce tahem	[mm ²]
S_{0(CH)}	Počáteční průřez pod vrubem Charpy tělesa	[mm ²]
S_f	Velikost lomové plochy	[mm ²]
S_p	Vzdálenost (rozteč) podpor při tříbodovém ohybu	[mm]
S_u	Konečná nejmenší plocha příčného průřezu	[mm ²]
T_i	Složka vektoru povrchové tahové síly	[N]
T_{SP}	Tranzitní teplota získaná ze SPT	[K]
t₅₀	Přechodová teplota vyhodnocená na základě 50ti % podílu křehkého (štěpného) a houževnatého (tvárného) lomu	[°C]
U	Elastická deformační energie tělesa	[J]
u_f	Deformace odpovídající porušení disku při SPT	[N]
u_m	Deformace při maximální síle při SPT	[N]
v	Posuv zatěžující síly	[mm]
V	Objemová jednotka materiálu	[m ³]
W	Výška zkušební tělesa pro LH	[mm]
W-a	Ligament (neporušený průřez před čelem trhliny)	[mm]
W_{el}	Elastická energie	[J]
w_f	Energie porušených vazeb u materiálů schopných plastické deformace	[J/m ²]
W_s	Práce spojená s vytvořením nových povrchů	[J]
Y	Tvarová funkce (tvarový součinitel)	[-]
Z	Kontrakce	[%]
α, β, γ	Experimentálně zjištěné koeficienty v rovnici proložení J-R křivky	[-]
α_{SPT}	Korelační koeficient pro SPT	[-]
β_{SP}, x_{SP}	Empiricky určené konstanty	[-]
Γ	Integrační křivka	[-]
γ_σ	Práce vykonaná meziatomovými silami při vzniku nového povrchu v ideálně křehkém tělese	[J/m ²]
δ, COD	Velikost rozevření ústí trhliny	[mm]
Δa	Nárůst trhliny v tělese	[mm]
δ_C	Kritická hodnota rozevření trhliny	[mm]
ΔL	Prodloužení zkušební tyče	[mm]
Δt	Teplotní posun	[°C]
ε	Poměrná deformace	[%]
ε_f	Efektivní lomová deformace	[-]
λ	Koeficient pro korekci nepřesnosti měření počáteční délky trhliny	[-]
ν	Poissonovo číslo	[-]
σ	Napětí	[MPa]
σ_y	Efektivní mez kluzu	[MPa]

1. Úvod

Pro návrh, výrobu a bezpečné používání jakékoli konstrukce je nezbytné znát mechanické vlastnosti použitých materiálů. Testování mechanických vlastností materiálů také hraje nezastupitelnou roli při kontrole technologie výroby, při kontrole jakosti a při přejímkách polotovarů či výrobků a také při vývoji nových materiálů.

Při výběru vhodného materiálu je nutné zvážit, která z vlastností je pro daný účel nejdůležitější. V rámci mechanických vlastností materiálu se v zásadě rozlišují čtyři vlastnosti: pružnost (elasticita), tvárnost (plasticita), pevnost a houževnatost. Mechanických charakteristik je však mnohem víc. Pro vlastní výběr materiálu je potřeba vyjádřit požadované vlastnosti číselně. Vyjádření vlastností materiálů číselnými hodnotami (materiálovými charakteristikami) je úkolem oboru, který se nazývá materiálové zkušebnictví nebo zkoušení materiálu. Materiálová charakteristika je číselná hodnota, která kvantifikuje určitou vlastnost a která se určuje experimentálně.

Důvod, proč je materiálových charakteristik více než mechanických vlastností materiálů, spočívá v experimentální povaze zjišťování těchto charakteristik. Pro určení libovolné materiálové charakteristiky musíme z daného materiálu vyrobít zkušební těleso a zkoušet vliv vnějších sil na těleso. Proto mechanické charakteristiky nejsou absolutní konstanty daného materiálu, ale jsou to veličiny, které do jisté míry závisejí na podmínkách zkoušky [1].

Problematika měření a hodnocení mechanických charakteristik materiálů je velmi rozsáhlá, proto se předkládaná disertační práce, v souladu se současnými trendy ve zkušebnictví, zabývá měřením mechanických charakteristik na miniaturních tělískách. Využití těchto metod je poměrně rozsáhlé, např. při odhadech zbytkové životnosti strojních zařízení, stanovení lokálních vlastností heterogenních materiálů a spojů, vyhodnocení anizotropie materiálů a všude tam, kde se objevují požadavky na zkoušení z velmi malého množství experimentálního materiálu.

Velmi časté uplatnění těchto metod je při hodnocení zbytkové životnosti provozovaných komponent v energetickém odvětví. Odhad zbytkové životnosti a včasné odhalení potenciálního nebezpečí selhání strojních zařízení a konstrukcí je klíčová otázka pro bezpečný a spolehlivý provoz v průmyslových podnicích. V dnešní době je tato otázka aktuální zejména v elektrárnách a v petrochemických podnicích, které se přiblížily své projektované životnosti. Po desetiletí, od doby, kdy byla tato zařízení postavena, mohly různé potenciální degradační procesy způsobit zhoršení mechanických vlastností a integrity provozovaných komponent. V době navrhování těchto konstrukcí byla životnost projektována na základě relativně jednoduchých přístupů vycházejících z praktických zkušeností a nakonec korigovaných příslušným bezpečnostním koeficientem. Ve světle významného pokroku v metalurgii a současně dostupných analytických metodách by bylo nyní možno zredukovat bezpečnostní koeficient a tím prodloužit projektovanou životnost těchto komponent až o 100 % [2]. Navíc díky současné politice, která preferuje výrobu elektřiny z obnovitelných zdrojů a přidává nová bezpečnostní opatření pro konvenční elektrárny, se jeví mnohem výhodnější a z ekonomického hlediska vhodnější prodloužit provoz současných zařízení nad jejich projektovanou životnost, spíše než postavení nových továren a elektráren. Nákladné investice na modernizaci a zefektivnění provozu těchto zařízení mají ale smysl jen tehdy, pokud tato zařízení mají dostatečnou zbytkovou životnost. Proto je snižování nejistoty v hodnocení a monitorování zbytkové životnosti strojních zařízení, zejména komponent energetických zařízení, elementární zájem průmyslu. Zbytková životnost provozovaného zařízení může být vyhodnocena pomocí standardních mechanických testů, jako jsou testy tečení, zkoušky tahem, zkoušky vrubové houževnatosti dle Charpyho nebo zkoušky lomové houževnatosti prováděné na kompaktních CT tělesech. Nicméně reálně obvykle není

možno z provozovaných komponent odebrat dostatečné množství materiálu pro tyto standardní zkoušky. Potřeba vyhodnocovat aktuální mechanické vlastnosti provozovaných zařízení proto vedla k navržení nových nedestruktivních či semidestruktivních testovacích metod na miniaturních tělesech [3].

Dalším atributem zkušebních metod na miniaturních tělesech je, že díky velmi malým rozměrům se zkouší pouze lokální charakteristiky materiálů. To může být někdy nevýhoda, zejména u testů velmi heterogenních materiálů, u kterých je nutné dobře zvážit místo odběru a obvykle je nutné udělat více těchto testů. Nicméně díky tomuto rysu miniaturních těles je možné měřit mechanické charakteristiky v místech, která jsou pro porušení součástí kritická, např. přechodové oblasti u svarových spojů či měření aktuálních vlastností nejvíce namáhaných míst v provozovaných komponentách energetických zařízení.

Při vývoji nových materiálů se často pracuje s velmi malým množstvím materiálu a také zde se zkoušky na miniaturních tělesech s výhodou uplatňují (např. zkoušení vzorku po termofyzikální simulaci či při hodnocení objemových materiálů s nanostrukturou vyrobených metodami velké plastické deformace, např. ECAP, HPT, CONFORM, ... [4]). V případě Mikrotahového testu (M-TT, tato metoda bude představena v dalším textu) lze mikro-tahové těleso s výhodou použít např. pro zkoušení tenkostěnných trubek, pokud potřebujeme měřit tahové vlastnosti v jiném směru než v axiálním (pro axiální směr lze využít standardní tahovou zkoušku).

Předkládaná práce si klade za úkol najít možnosti, jak určit věrohodným způsobem mechanické charakteristiky materiálů (měřených na standardizovaných tělesech) pomocí nestandardních zkoušek miniaturních těles, které využívají malého objemu experimentálního materiálu. Malým objemem materiálu je v tomto případě myšleno množství materiálu, které je možno odebrat (např. z provozovaných komponent) pomocí odběrových zařízení jako jsou SSamTM-2 [5] nebo zařízení EDSE [6] [7]. Tato zařízení budou popsána v kapitole 5.1.

COMTES FHT a.s. disponuje zařízením EDSE a proto bylo přednostně uvažováno s použitím experimentálního materiálu odebíraného pomocí tohoto zařízení. Velikost odebraného vzorku závisí na použité elektrodě a nastavení hloubky odběru, nicméně standardní vzorek má rozměr 20x25x3±2 mm. Z tohoto vzorku lze vyrobit několik miniaturních těles pro různé typy zkoušek.

V rámci zkoušek miniaturních těles bude největší pozornost věnována metodě Small Punch Test (SPT). Záznam z této zkoušky slouží pro vyhodnocení standardních materiálových charakteristik.

Standardními materiálovými charakteristikami určovanými ze SPT jsou zejména:

1. Mez pevnosti R_m a mez kluzu $R_{p0,2}$ určené ze zkoušky tahem
2. Přechodová teplota $FATT_{50}$ určená ze zkoušky rázem v ohybu dle Charpyho
3. Charakteristiky používané v lomové mechanice – lomová houževnatost J_{IC} a K_{IC}

Teoretická část práce se zabývá třemi standardními způsoby zkoušení (zkouškou tahem, viz kapitola 2, zkouškou rázem v ohybu, viz kapitola 3 a zkouškami lomové houževnatosti, viz kapitola 4) a poměrně novou zkušební metodou Small Punch Test (viz kapitola 5.2). Účelem teoretické části je popsat tyto čtyři zkoušky s důrazem na metodiku měření a vyhodnocení hodnot, které se budou vůči sobě korelovat, neboť v některých případech použitá norma může mít vliv na hodnoty naměřených mechanických charakteristik. Nebezpečí zkreslení korelačních vztahů je zřejmé zejména u měření lomové houževnatosti a jako příklad bude v kapitole 6.4.5 srovnáno vyhodnocení hodnot LH pomocí metody UC dle norem *ASTM E1820-09* [8] a *ISO 12135* [9]. Bude také detailně popsána zkouška SPT prováděná dle dokumentu CWA 15627 [10].

Vyhodnocení výše uvedených charakteristik ze SPT je často prováděno na základě výpočtů z předem určených korelačních vztahů, a proto budou v rámci teoretické části popsány publikované typy korelačních vztahů. Jedním z cílů předkládané práce je tyto korelační vztahy verifikovat, popř. zpřesnit či navrhnout vhodnější a dále diskutovat oblasti použitelnosti a limity v hodnocení mechanických charakteristik pomocí přístupu na základě empirických korelací. Ačkoli je SPT stále více diskutovaná a používaná metoda, neustálá nutnost přepočtu naměřených hodnot na standardní charakteristiky pomocí korelací je její velká nevýhoda, neboť to obnáší vytvoření databáze pro zkoumané typy materiálů. Tato nevýhoda by byla částečně odstraněna, pokud by byly výsledky z miniaturních těles použitelné univerzálněji.

Toho by bylo možno dosáhnout, pokud se použijí či navrhnou testy využívající miniaturní tělesa pro vyhodnocení výše zmíněných charakteristik, které se svým způsobem zatěžování přibližují (nebo jsou zcela shodné) se standardními zkouškami. U těchto testů se dá předpokládat, že případné korelace na standardní materiálové charakteristiky budou více spolehlivé nebo dokonce nebudou vůbec potřeba. V rámci této práce se jedná o zkoušky rázem v ohybu na mini-Charpy tělesech a zkoušky tahem na nově navržené geometrii mikro-tahového tělesa vycházejícího z velikosti SPT disku (zde nazvané Mikro-tahové testy, viz **kap.5.3**). Tyto stěžejní cíle předkládané práce graficky ilustruje schéma na **Obr. 1**.

Experimentální část se v těsné návaznosti na teoretickou část zabývá měřeními a vyhodnocením materiálových charakteristik na standardních tělesech a poté jsou na zkoumaných materiálech měřeny charakteristiky metodou SPT pro určení korelačních hodnot ze SPT na standardně naměřené materiálové charakteristiky. Mini-Charpy tělesa budou u vybraných materiálů použita pro určení nárazové práce, vrubové houževnatosti a přechodové teploty **FATT₅₀**. V rámci zkoušek rázem v ohybu bude také diskutován vliv velikosti tělesa na naměřenou hodnotu **KCV**.

Pro určení standardních tahových vlastností (**R_m**, **R_{p0,2}**, **A**, **Z**) bude verifikována geometrie navrženého mikro-tahového tělesa a hledána nejvhodnější metodika provádění M-TT. Pro vybrané materiály bude tato metoda odzkoušena a vyhodnocena.

Z toho, co již bylo zmíněno, se cíle této práce dají shrnout do následujících bodů:

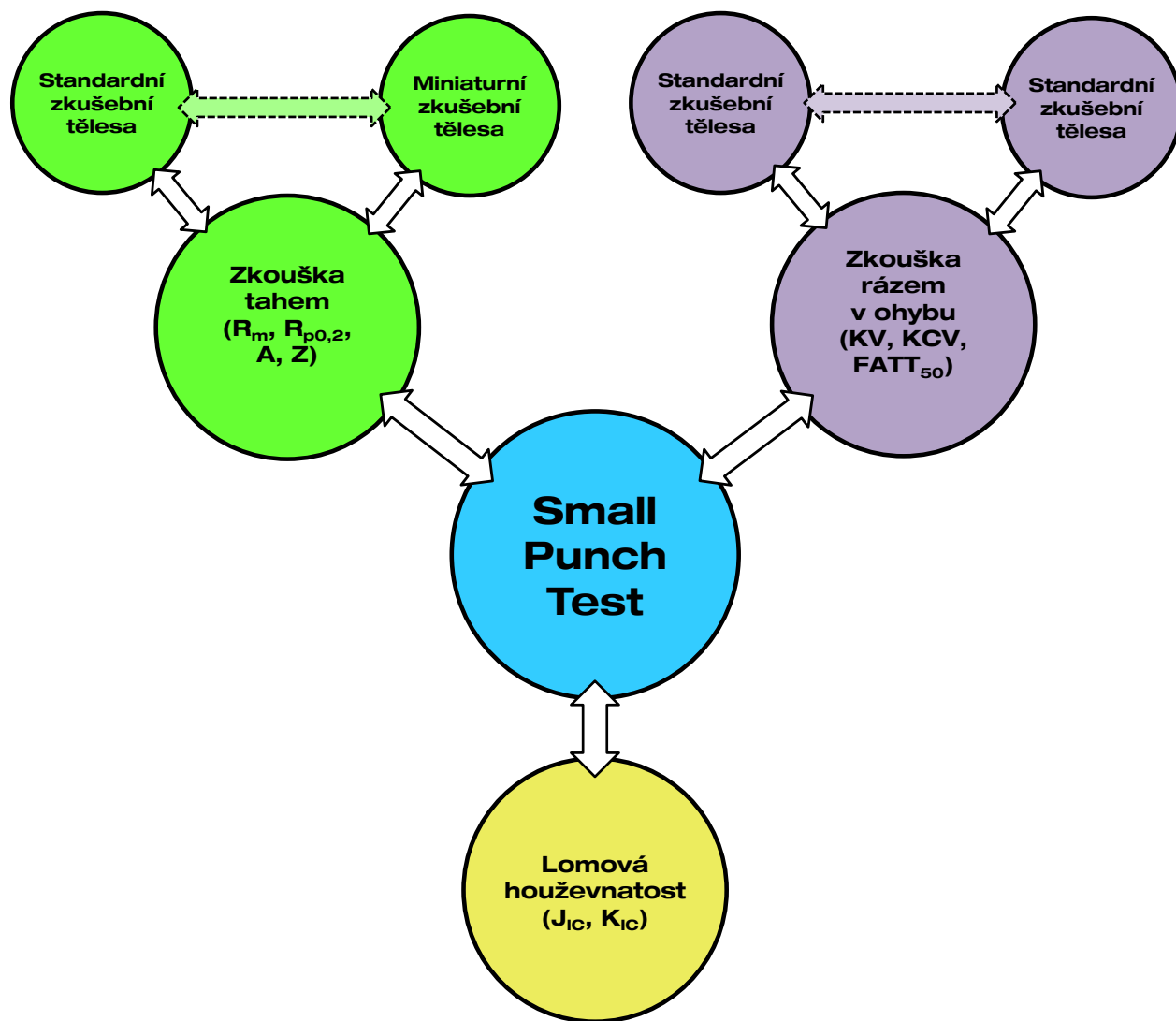
- Posoudit aplikovatelnost vztahů uvedených v kapitolách **5.2.5**, **5.2.6** a **5.2.7**, které se zabývají korelací SPT hodnot na výše zmíněné konvenční materiálové charakteristiky (vyjma tažnosti a kontrakce, které se ze SPT nevyhodnocují)
- Diskutovat vliv velikosti Charpy těles na získané hodnoty nárazové práce, vrubové houževnatosti a přechodové teploty **FATT₅₀**
- Návrh metodiky zkoušení M-TT a verifikace této metody, z níž lze určit všechny charakteristiky získané při zkoušce tahem, tedy mez pevnosti **R_m**, meze kluzu **R_{p0,2}** a navíc, v porovnání se zkouškou SPT, také tažnost **A** a kontrakci **Z**.

Pro splnění cílů disertační práce bylo vybráno a testováno celkem 7 materiálů, z nichž některé byly podrobeny tepelnému zpracování, jehož výsledkem byly výrazně jiné mechanické vlastnosti oproti dodanému základnímu materiálu. Celkem tak vzniklo 19 různých materiálových stavů s různými mikrostrukturami a tím také výrazně odlišnými mechanickými charakteristikami, kdy se mez pevnosti pohybovala od cca 640 MPa do 1970 MPa. Z hlediska lomového chování se hodnoty lomové houževnatosti **J_{IC}** pohybovaly v rozmezí od cca 45 MPa.m^{1/2} do 380 MPa.m^{1/2}, hodnoty vrubové houževnatosti **KCV** od cca 78 J do 277 J a hodnoty **FATT₅₀** od -39°C do +14 °C (při uvažování s výsledky z práce [11] byla horní zkoumaná teplota **FATT₅₀** +52 °C).

Pro získání požadovaných výsledků bylo celkem naměřeno:

1. zkoušek tahem: **45**
2. instrumentovaných testů na tělesech Charpy (včetně podrozměrných těles): **128** testů pro určení velikostního faktoru při 20°C a **60** testů pro určení korelací mezi přechodovými teplotami $FATT_{50}$
3. testů LH: **28** testů metodu více těles a **11** těles metodou UC (metoda jednoho tělesa)
4. testů SPT: **121** testů při +20 °C a **15** testů SPT při jiných teplotách

Na základě experimentů bude diskutována kompatibilita výsledků jednotlivých materiálových charakteristik.



Obr. 1 Grafické vyjádření hodnot naměřených pomocí SPT a miniaturních těles korelovaných na materiálové charakteristiky naměřené na standardních tělesech

2. Zkouška tahem

Zkouška tahem je jedna ze základních a nejdůležitějších zkoušek. Její historie sahá až do 15. století, kdy Leonardo da Vinci zkoušel pevnost konopných lan jednoduchou tahovou zkouškou. První zkušební tahový stroj byl postaven roku 1729 a systematicky začalo zkoušení pevnosti od poloviny 19. století [12].

Význam této zkoušky spočívá např. v [13]:

- hodnocení kvality materiálu
- nákup – prodej (technické dodací podmínky EN)
- expertíza havárií
- pevnostní výpočty (únava)
- základní mechanické vlastnosti – v materiálových listech a databázích

Provedení zkoušky se řídí normou ČSN EN ISO 6892-1 [14] platnou od února 2010, která tímto nahradila do té doby platnou normu ČSN EN 10 002-1 [15] z února 2002.

Zkouška tahem spočívá v deformaci zkušební tělesa tahovým zatížením, obvykle do lomu, za účelem stanovení pevnostních a deformačních charakteristik. Napětí a deformační rychlost je stanovena normou.

2.1. ZKUŠEBNÍ TYČE

Tvar a rozměry zkušebních tyčí závisí na tvaru a rozměrech kovových výrobků, pro které jsou určovány mechanické vlastnosti. Zkušební tyč je obvykle připravena obráběním vzorku odebraného z výrobku; vzorky o stálém příčném průřezu (profily, dráty, tyče) mohou být podrobeny zkoušce bez obrobení. Příčný průřez zkušebních těles může být kruhový, čtvercový, obdélníkový, prstencový nebo jiného tvaru.

2.1.1. Poměrná zkušební tělesa

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

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

2.1.2. Nepoměrná zkušební tělesa

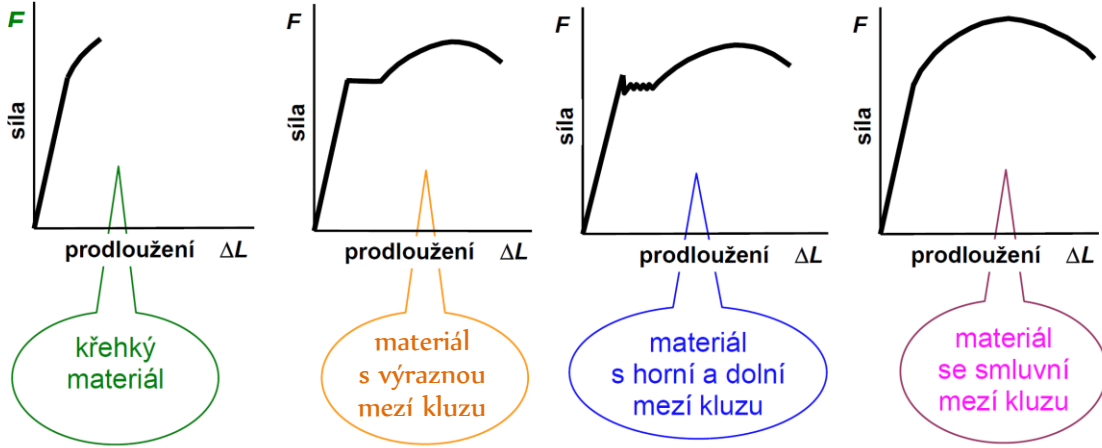
U nepoměrných zkušebních těles nezávisí počáteční měřená délka na počátečním průřezu tělesa. Jsou to např. zkušební tělesa vyrobená z plechů o tloušťce do 3 mm.

2.2. Základní typy tahových diagramů

Vynesením zátěžné síly a prodloužení zkušební tyče do grafu vznikne tahový diagram, v němž je nezávisle proměnnou prodloužení zkušební tyče a závisle proměnnou síla. Základní typy těchto tahových diagramů jsou uvedeny na **Obr. 2**. Moderní elektronické trhací stroje umožňují automatický průběžný přepočítání zátěžné síly na napětí podle vztahu (2) a prodloužení zkušební tyče na poměrnou deformaci podle vztahu (3).

Tahové diagramy potom mohou být vynášeny v souřadnicích σ [MPa] – ε [%]. Počáteční průřez zkušební tyče i počáteční měřená délka jsou konstanty, a proto tahové diagramy vynášené

v souřadnicích $\sigma - \varepsilon$ jsou tvarově shodné s diagramy vynášenými v souřadném systému $F - \Delta L$; na osách jsou však jiné charakteristiky s odpovídajícími měřítky a jednotkami [16].



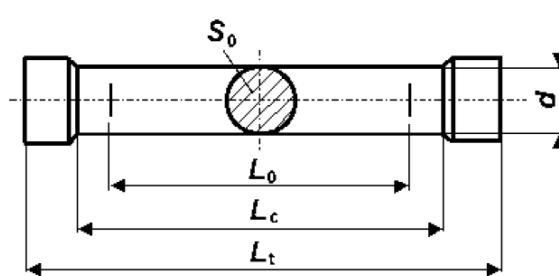
Obr. 2 Základní typy tahových diagramů [16]

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

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

2.3. Vyhodnocení základních charakteristik

Pro vyhodnocení základních charakteristik se před zkouškou na zkušební tělese vyznačí počáteční měřená délka a změří se rozměry tělesa, aby bylo možno vypočítat počáteční zkoušený průřez. Příklad tělesa s kruhovým průřezem je zobrazen na Obr. 3. Charakteristikami určenými ze zkoušky tahem jsou zejména napěťové charakteristiky mez pevnosti a mez kluzu a deformační charakteristiky tažnost a kontrakce, které mají pro tuto práci zásadní význam.



Obr. 3 Příklad zkušební tělesa pro zkoušku tahem [16]

2.3.1. Mez pevnosti

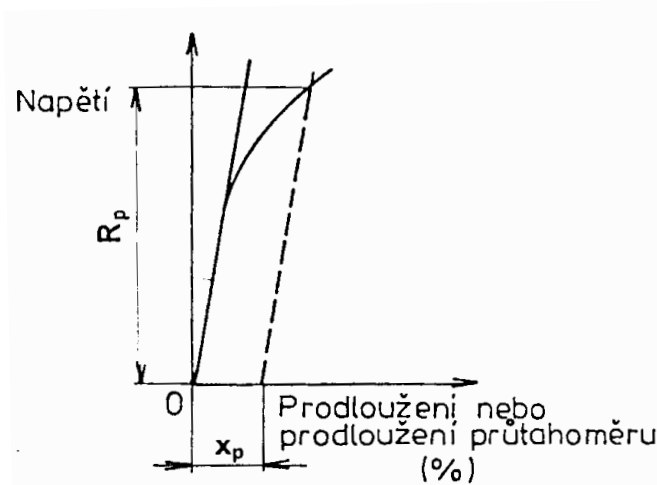
Mez pevnosti v tahu je maximální napětí dosažené ve smluvním diagramu $\sigma - \epsilon$, což je poměr hodnot maximální síly dosažené při zkoušce a počátečního průřezu zkušební tělesa, viz rovnice (4).

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

2.3.2. Mez kluzu

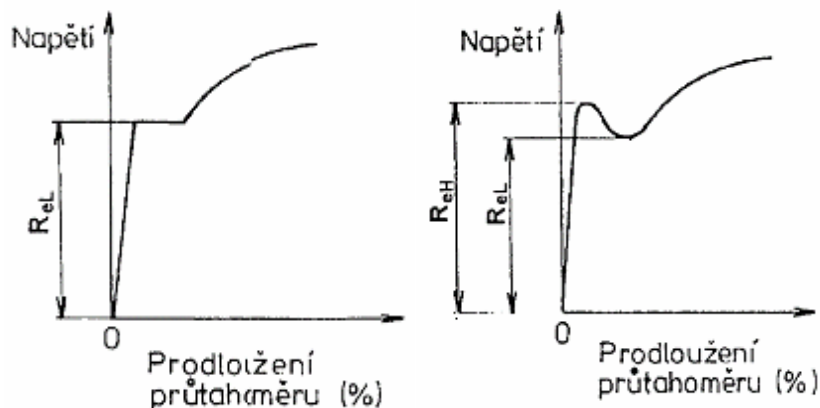
Mez kluzu je definována jako napětí, při kterém se zkoušený materiál začíná plasticky deformovat. Charakter přechodu mezi elastickou a plastickou deformací je dán typem materiálu. Dle naměřené závislosti $\sigma - \epsilon$ vyhodnocujeme:

1. **smluvní mez kluzu R_p [MPa]**, což je napětí, při kterém plastická deformace dosáhne předepsané hodnoty x_p vyjádřené v % počáteční měřené délky průtahoměru L_e . Označuje se symbolem, jehož index vyjadřuje hodnotu plastické deformace v % - např. $R_{p0,2}$ (viz Obr. 4).



Obr. 4 Vyhodnocení smluvní meze kluzu [13]

2. **výraznou mez kluzu R_{eH} a R_{eL}** , kde R_{eH} [MPa] je napětí odpovídající prvnímu okamžiku poklesu napětí a R_{eL} [MPa] je nejnižší napětí v průběhu plastického kluzu kovu (viz Obr. 5).



Obr. 5 Dolní a horní meze kluzu [13]

2.3.3. Tažnost

Tažnost je poměrná podélná trvalá deformace vyjádřená v % a je dána vztahem (5). Pokud se tažnost měří na poměrných zkušebních tyčích a koeficient proporcionality je roven 5,65, pak se nemusí k symbolu A přidávat žádný index; v opačném případě norma [14] doporučuje značku A doplnit indexem označujícím součinitel proporcionality. U nepoměrných zkušebních tyčí se doporučuje značku A doplnit indexem označujícím použitou počáteční měřenou délku v mm.

Mnoho laboratoří má však zavedené odlišné indexování symbolu A (např. dle DIN 50 145), které vychází z násobků průměru tyče s kulatým průřezem. Např. tažnost A_5 dle tohoto značení znamená, že rysky počáteční měřené délky byly vyneseny ve vzdálenosti pětinasobku průměru kulaté zkušební tyče, ale tato vzdálenost je zároveň stejná hodnota, která po zaokrouhlení vychází při použití vztahu (1) pro $k_p=5,65$. Proto se tažnosti A_5 rovnají tažnostem A .

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

2.3.4. Kontrakce (zúžení)

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

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

3. Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy

Zkouška rázem v ohybu je základní zkouškou hodnocení houževnatosti materiálů. Je měřítkem citlivosti materiálu vůči místní koncentraci napětí při dynamickém namáhání [17]. Historie zkoušek rázem v ohybu sahá až do roku 1901, kdy na sjezdu Mezinárodního svazu pro technické zkoušení materiálu v Budapešti přednášel Francouz G. Charpy o svých zkouškách zjišťování houževnatosti přerážením prismatických tyčí opatřených vrubem. V roce 1909 na V. kongresu v Kodani bylo doporučeno normování Charpyho zkoušky, která se brzy ujala a rozšířila po celé Evropě [18].

K zavedení zkoušky rázem v ohybu vedla snaha vyhnout se katastrofálním (křehkým) porušením konstrukcí (více o motivaci k hodnocení odolnosti ocelí proti křehkému porušení je uvedeno v kapitole 4.1 pojednávající o vzniku lomové mechaniky).

Během 20. století se objevily ještě další metody zkoušky rázem v ohybu (např. podle Izoda) a i samotná tělesa používaná dle Charpyho metody doznala určitých změn. V současné době mají tělesa rozměry 10x10x55 mm a jsou opatřeny jednostranným V nebo U vrubem. Bližší podmínky zkoušky popisuje norma ČSN ISO 148-1:2009 [19], která v září 2010 nahradila dříve používanou normu ČSN EN 10045-1 [20] z června 1998.

3.1. Podstata zkoušky

Podstata zkoušky spočívá v přerážení zkušební tyče jedním rázem kyvadlového kladiva za podmínek stanovených normou [19], přičemž zkušební tyč má uprostřed vrub a je podepřena na obou koncích. Měřenou veličinou je nárazová práce, která je měřítkem odolnosti materiálu proti rázovému namáhání a stanovuje se v joulech. Hodnoty nárazové práce **KV** nebo **KU** pak značí, zda se použilo těleso s U nebo V vrubem. Dále je možné se setkat s pojmem vrubová houževnatost, která je dána podílem nárazové práce potřebné k přerážení tyče k počátečnímu průřezu tyče v místě vrubu dle rovnice (7).

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

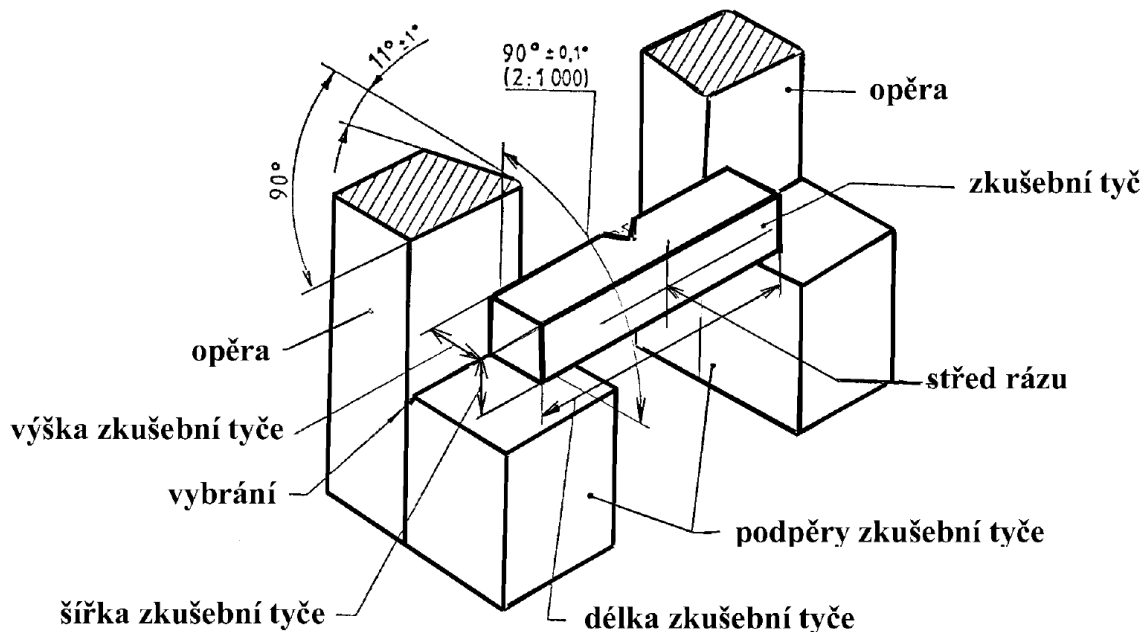
V předcházející normě ČSN EN 10045-1 je ještě o hodnotě **KCV** zmínka v národní příloze (informativní), v normě ČSN ISO 148-1 je již tento pojem vypuštěn. Pro odhad křehkolomového chování při zkouškách rázem v ohybu v závislosti na velikostním faktoru je však výhodné pracovat s pojmem vrubová houževnatost i nadále a v experimentální části tak budou korelovány naměřené hodnoty **KCV** pro různé velikosti Charpy těles.

Protože se hodnoty nárazové práce u mnoha kovových materiálů výrazně mění s teplotou, musí se zkoušky provádět při specifikované teplotě. Jedná-li se o jinou teplotu než o teplotu okolí, musí být zkušební těleso zahřáté nebo ochlazené na danou teplotu za řízených podmínek.

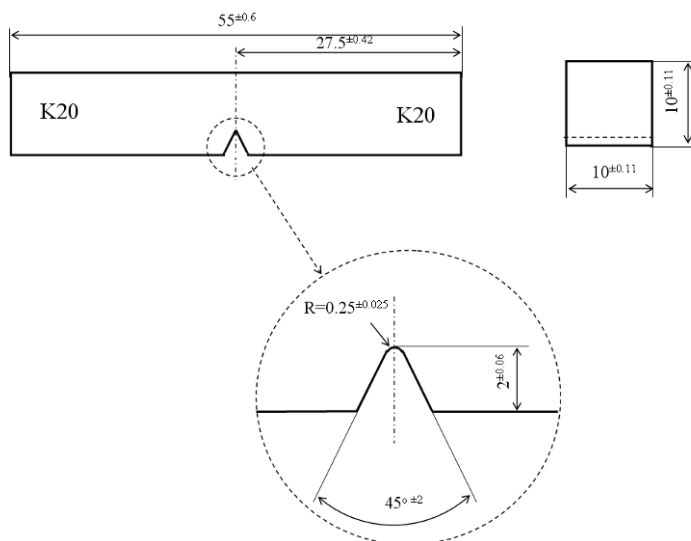
Umístění zkušební tyče na podporách ukazuje **Obr. 6**. Dle normy [19] lze použít zkušební tělesa s U vrubem nebo s V vrubem. V této práci je použito pouze těleso s V vrubem, jehož geometrie je znázorněna na **Obr. 7**. Jestliže není možné z materiálu vyrobit standardní zkušební těleso, norma povoluje použití těles s menší šířkou (7,5mm, 5mm, a 2,5mm).

Dále byla použita mini-Charpy tělesa dle normy [21], jejichž geometrie je znázorněna na **Obr. 8**. Tato tělesa se používají při nedostatku experimentálního materiálu, popř. je lze vyrobit z částí již vyzkoušených standardních těles. Tato tělesa lze také vyrobit z experimentálního materiálu odebraného pomocí zařízení EDSE (viz kapitola 5.1). Pro dosažení předepsané délky 27 mm je třeba navařit (bez tepelného ovlivnění) oba konce zkušební tělesa.

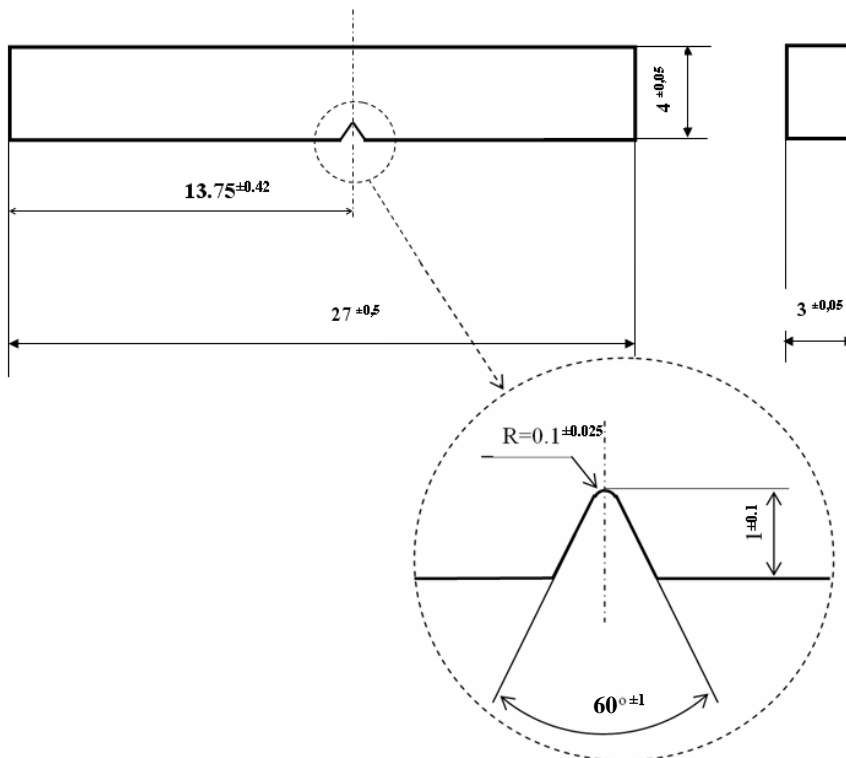
Pro testování standardních těles se obvykle používají kladiva o počáteční energii 300J, které se při dopadu na zkušební tyč pohybují rychlostí cca 5 m/s a pro zkoušení mini-Charpy těles kladiva o počáteční energii 15J a dopadovou rychlostí cca 3,5 m/s.



Obr. 6 Uspořádání zkoušky rázem v ohybu metodou Charpy [20]



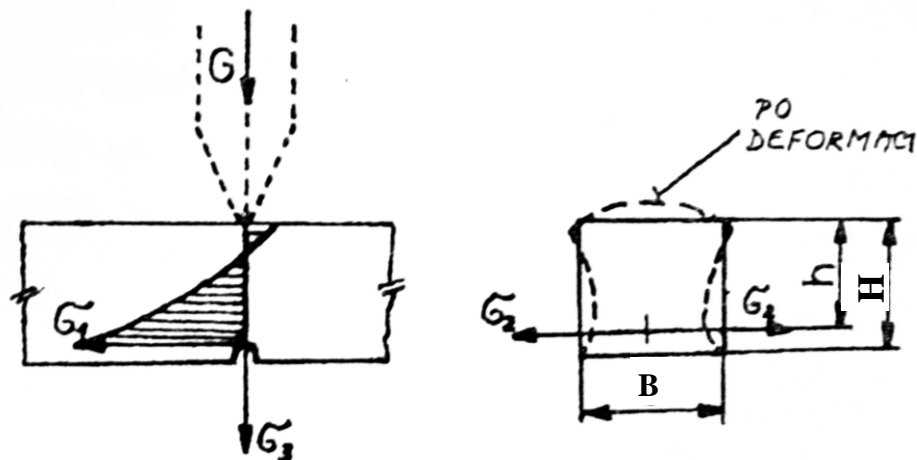
Obr. 7 Geometrie zkušebního tělesa pro zkoušky rázem v ohybu metodou Charpy – V vrub



Obr. 8 Geometrie mini-Charpy tělesa pro zkoušky rázem v ohybu

3.2. Vliv šířky zkušební tyče

V okamžiku rázu působí na dně vrubu hlavní tahové napětí σ_1 ve směru podélné osy tyče, příčné tahové napětí σ_2 ve směru osy vrubu a tahové napětí σ_3 kolmo k σ_1 i σ_2 (viz Obr. 9). Napětí σ_1 je ovlivňováno hlavně hloubkou a ostrostí vrubu, napětí σ_2 závisí hlavně na délce vrubu, tj. na šířce zkušebního tělesa. Narůstá-li šířka tyče, zvětšuje se σ_2 a mírně roste také zjišťovaná hodnota vrubové houževnatosti. Od určité kritické šířky zkušební tyče (je různá podle druhu materiálu) však vzniká lom předčasně a je křehký [17].



Obr. 9 Průběh napětí ve zkušebním Charpy tělese [17]

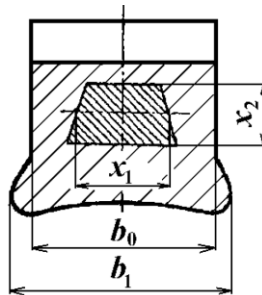
3.3. Vyhodnocení přechodové teploty

Měříme-li při zkoušce rázem v ohybu závislost velikosti absorbované energie na teplotě zkoušky, je výsledkem (v případě, že materiál vykazuje tranzitní chování) přechodová (tranzitní) křivka. Při relativně nízkých teplotách dostáváme nízké hodnoty absorbované energie a křehké lomy (nacházíme se v oblasti tzv. spodních prahových hodnot). Při vyšších teplotách jsou naopak lomy houževnaté a hodnoty absorbované energie relativně vysoké. Jedná se o tzv. oblast horních prahových hodnot. Mezi těmito dvěma oblastmi se nachází přechodová (tranzitní) oblast, kde co do podílu štěpného a tvárného lomu v lomové ploše jsou lomy smíšené a hodnoty vrubové houževnatosti klesají s klesající teplotou z úrovně horních prahových hodnot na úroveň dolních prahových hodnot [22].

Metod vyhodnocení přechodové teploty je několik. Při hodnocení se vychází buď z vyhodnocení nárazové práce (např. tranzitní teplota $KV=27$ J nebo jako střední hodnota max. a min. absorbované energie), nebo z vyhodnocení podílu křehkého a houževnatého lomu. Nejběžněji užívanou tranzitní teplotou je teplota t_{50} , což je teplota, kdy je na lomové ploše 50% štěpného (a tedy i 50% tvárného) lomu. V zahraniční literatuře je tato teplota označována jako $FATT_{50}$, což je zkratka vytvořená z anglického názvu teploty: Fracture Appearance Transition Temperature. Podíl křehkého lomu BF (brittle fracture) se vyhodnotí ze vztahu (8) pomocí měření štěpně porušené oblasti na lomové ploše (viz Obr. 10).

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

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

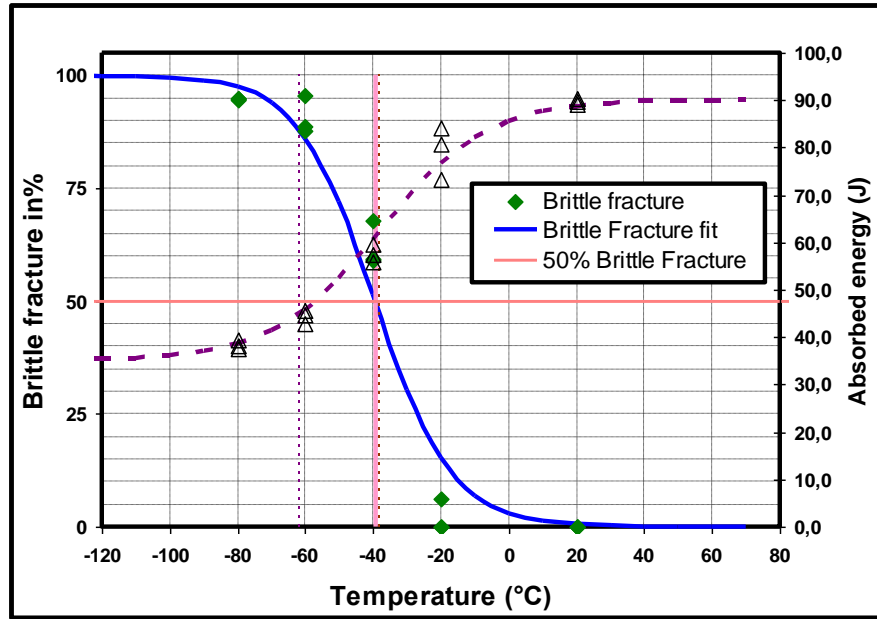


Obr. 10 Způsob vyhodnocení křehkého lomu z lomové plochy [23]

Přechodová křivka se obvykle určuje přeražením 3 tyčí pro každou měřenou teplotu (obvykle se měří nejméně 5 různých teplot). Teploty se volí tak, aby krok mezi nimi byl 20 až 40° C a pokrývaly jak dolní, tak i horní plato prahových hodnot. Pak se vynese křivka závislosti podílu křehkého lomu na teplotě, ze které se určí přechodová teplota $FATT_{50}$ (viz Obr. 11).

Na zkušebních tyčích, které mají rozměry odlišné od standardních tyčí, naměříme i jiné přechodové teploty. V literatuře je závislost mezi tranzitními teplotami stanovenými na zkušebních tělesech různé velikosti nejčastěji popisována vztahem (9) [24][25].

$$DBTT_{full\ size} = DBTT_{typex} + \Delta t \quad (9)$$

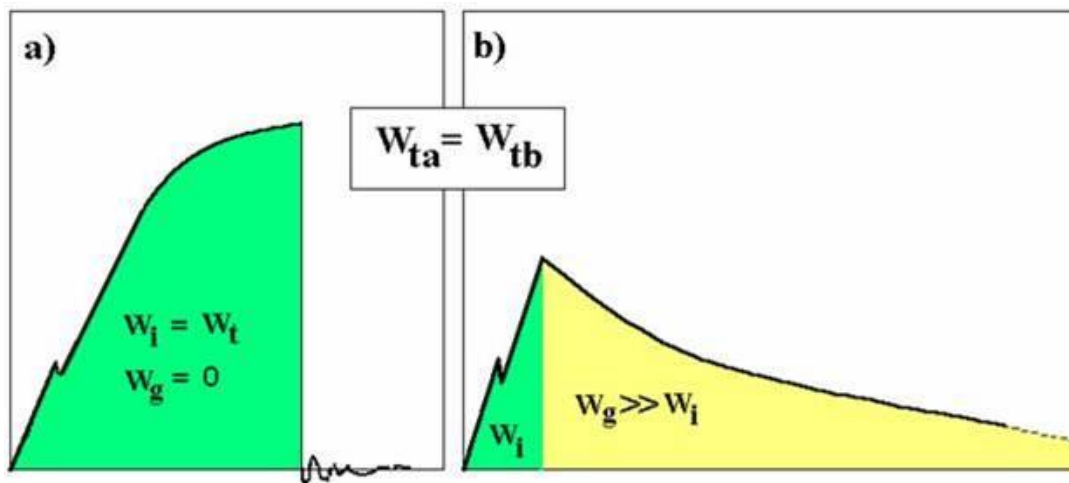


Obr. 11 Příklad určení přechodové teploty $FATT_{50}$

3.4. Instrumentovaná zkušební metoda

Základem této metody je instrumentovaný břit umožňující snímat průběh síly v závislosti na čase v okamžiku přeražení tělesa. Integrací plochy pod křivkou v závislosti síla-průhyb zjistíme velikost práce potřebné na přeražení zkušebního tělesa [26].

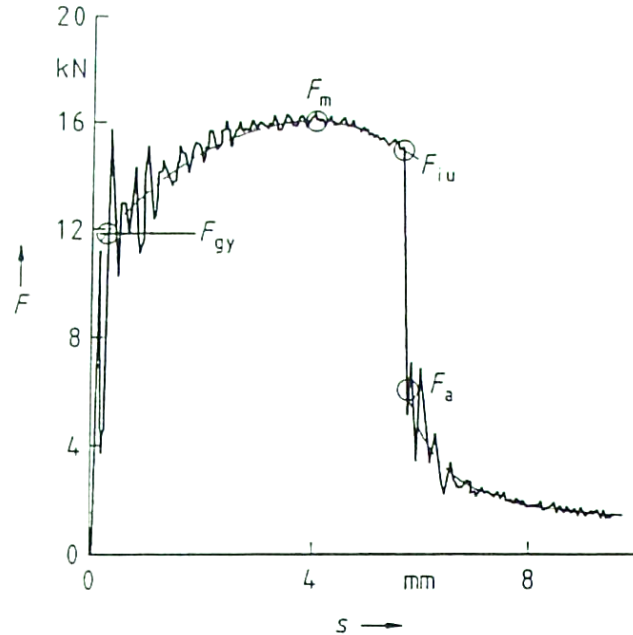
Výhody instrumentace kyvadlových kladiv pro zkoušky rázem v ohybu spočívají především ve „zviditelnění“ celého lomového procesu, možností porovnávat účinněji různé materiály, vliv odlišného tepelného zpracování atd. Např. hodnoty smluvních energií pro iniciaci a pro šíření trhliny mohou být navzájem porovnávány u různých variant chemického složení a mechanicko-tepelného zpracování téhož materiálu v různém vzájemném poměru, přestože jejich součet může dávat stejnou celkovou absorbovanou energii. Názorný příklad je uveden na Obr. 12



Obr. 12 Odlišné případy chování dvou různých ocelí, které vykazují stejné hodnoty KV [22]

Instrumentovaná zkouška rázem v ohybu je v souladu s normou ČSN ISO 148-1 [19] a řídí se normou ČSN EN ISO 14556: Ocel – Zkouška rázem v ohybu na kyvadlovém kladivu tyčí Charpy s V-vrubem – Instrumentovaná zkušební metoda vydanou 1. 6. 2001 [21]. Tato norma také popisuje způsob vyhodnocení této zkoušky.

Obr. 13 představuje obecný průběh záznamu síla-posunutí, ze kterého je možné vyhodnotit všechny čtyři charakteristické síly, které při instrumentovaném provedení zkoušky rázem v ohybu mohou nastat - F_{gy} , F_m , F_{iu} a F_a .



Obr. 13 Stanovení charakteristických hodnot síly při zkoušce rázem v ohybu [21]

Pro přibližný výpočet (s přesností do 20%) podílu křehkého lomu v lomové ploše se používají vztahy (10) - (13). Tyto vztahy byly vyvinuty v různých laboratořích a pro různé ocele s různým stupněm houževnatosti. Volba vztahu by měla být založena na předchozí zkušenosti s chováním zkoumaného materiálu [21]. Pro vyhodnocení podílu křehkého lomu byl v této práci použit vztah (12).

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

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

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

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

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

4. Lomová mechanika

Lomová mechanika je interdisciplinární obor na rozhraní mezi naukou o materiálu a mechanikou. Základním cílem lomové mechaniky je poskytnout metodiku, která umožňuje popsat chování trhlin v tělesech za podmínek odpovídajícím situacím, ve kterých se nacházejí konstrukce v provozu. Kompenzuje tím neadekvátnost konvenčních konstrukčních návrhů, které jsou založeny na tahové pevnosti, mezi kluzu, pevnosti na vzpěr a podobných statických vlastnostech materiálu. Tato konvenční kritéria jsou adekvátní pro mnoho inženýrských konstrukcí, ale jsou neúspěšná v případě, že připustíme možnost výskytu defektů. Existence těchto defektů je však objektivním jevem, který je třeba při návrhu konstrukce vzít v úvahu. Hlavním úkolem lomové mechaniky je stanovit kritéria, která určí, zda a jakým způsobem se bude za daných podmínek trhlina či defekt šířit a v této souvislosti stanovit maximální kritické hodnoty aplikovaného napětí, případně největší přípustnou velikost defektu. Vhodnou aplikací poznatků lomové mechaniky již ve stadiu návrhu a vývoje lze významně snížit riziko poruchy a tedy zvýšit bezpečnost a spolehlivost provozu konstrukce [27][28].

Lomová mechanika v experimentální části zjišťuje odpor materiálu proti růstu trhliny zkouškami na vzorcích s trhlínami za různých podmínek. Přístup lomové mechaniky je tedy fenomenologický. Není omezen pouze na křehký lom, podobný postup je možno použít i na nestabilní lomy houževnatého charakteru a s jistými modifikacemi i na stabilní růst trhliny, např. při cyklickém namáhání. Lomová mechanika je schopna poskytnout odpovědi na otázky [29]:

- zbytkové pevnosti
- přípustné velikosti trhliny pro očekávané provozní zatížení
- potřebné doby (počtu cyklů) pro nárůst trhliny do její kritické velikosti
- délky period pravidelných kontrol zjišťujících chování trhliny
- volby vhodného materiálu pro požadované vlastnosti konstrukce

4.1. Historické pozadí vzniku lomové mechaniky

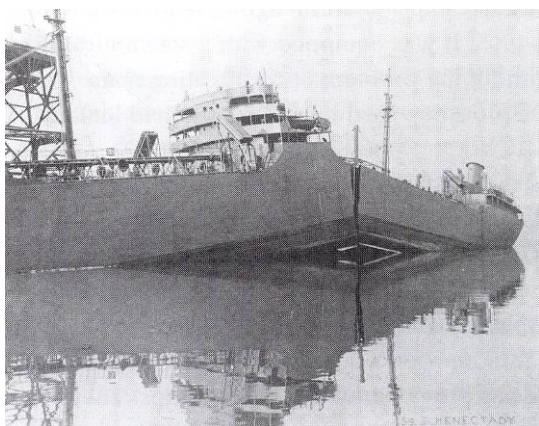
Lomová mechanika vznikla jako důsledek snahy po objasnění zákonitostí vzniku lomu při relativně nízkých napětích v materiálech o vysoké pevnosti, především v leteckém průmyslu.

Klasické metody dimenzování konstrukcí jsou založeny na předpokladu materiálu jako homogenního izotropního kontinua. Skutečný materiál a jeho spoje (např. svarové) se však liší od tohoto předpokladu a to více či méně výrazně. V této skutečnosti je možno také spatřovat hlavní příčinu havárií celé řady kovových – především ocelových – konstrukcí. Např. na konci II. světové války nastávaly hromadné havárie celosvařovaných konstrukcí lodí typu Liberty. Z 2500 vyrobených lodí se jich 145 rozlomilo na dvě části a téměř 700 jich bylo postiženo vážnými závadami (viz **Obr. 14a**).

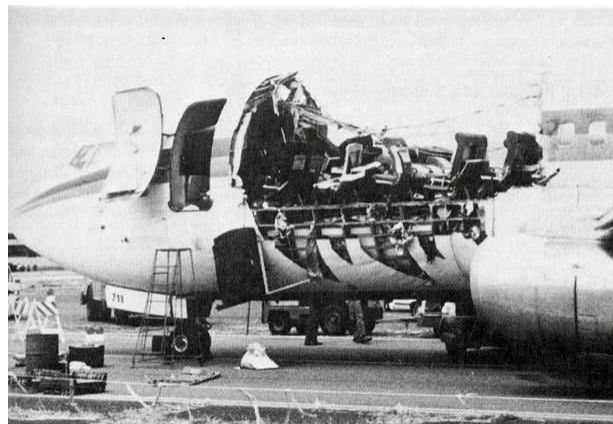
Další známé havárie jsou zřícení letadel Comet (viz **Obr. 14b**), kde se jednalo o opakované havárie v relativně krátkých intervalech (např. v květnu 1953 blízko Kalkaty v mimořádně prudké tropické bouři, 10. května 1954 u ostrova Elba, 8. dubna 1954 u Káhiry, avšak za dobrých povětrnostních podmínek). Z následných analýz vyplynulo, že příčinou jsou hranatá okna, ze kterých se iniciovala trhlina [30].

V padesátých letech se také objevilo velké množství havárií mostů, plynovodů, ropovodů, velkých nádrží – všeobecně tedy značně rozměrných konstrukcí. K těmto lomům docházelo náhle, bez jakékoliv výraznější předchozí plastické deformace, při namáháních ležících spolehlivě pod mezí kluzu. Lomy měly křehký charakter a byly doprovázeny jen malou plastickou deformací. Tyto zpočátku zdánlivě nevysvětlitelné nehody se po rozsáhlých výzkumech podařilo vysvětlit. Primární příčinou byly defekty v konstrukčních materiálech či

ostré konstrukční vruby, na kterých docházelo k lokální koncentraci napětí a ke vzniku trojosé napjatosti.



a)



b)

Obr. 14 a) Křehký lom celosvařovaného trupu lodí Liberty [31]

b) Křehký lom trupu letadla Comet [32]

V souvislosti s křehkým lomem je třeba ještě zmínit, že se po 2. světové válce začaly (v důsledku snah o snížení hmotnosti) používat v širší míře oceli s vysokou mezí pevnosti. Rozvíjející se výpočtové metody umožňovaly přesnější stanovení lokálních napětí a tím se mohlo přistoupit ke snížení součinitelů bezpečnosti. Potom ovšem také provozní cyklická namáhání byla mnohdy natolik vysoká, že (často ještě v součinnosti s okolním agresivním prostředím) mohla vyvolat vznik trhlin – zvláště pokud zde současně existovaly nějaké koncentrátoři napětí. Těmi byly mimo jiné svarové spoje – též častý zdroj technologických vad a to dokonce vad typu trhlin. Tyto vysokopevné materiály však měly současně nízkou lomovou houževnatost, takže jejich odolnost proti křehkému porušení nebyla vždy postačující (zbytková pevnost za přítomnosti trhliny byla nízká). Studium těchto poruch vedlo ke vzniku nové disciplíny – lomové mechaniky, jejíž vývoj pokračuje i v dnešní době [28][29].

4.2. Rozdělení lomové mechaniky

V průběhu svého vývoje se lomová mechanika rozdělila do dvou hlavních oblastí. Jsou to:

1. oblast lineární elastické lomové mechaniky (LELM), předpokládající platnost Hookova zákona mezi složkami napětí a deformace v oblasti u kořene trhliny. Za určitých zjednodušujících předpokladů je LELM schopna popsat napětově deformační poměry u kořene trhliny i při existenci malé plastické zóny;
2. oblast elasticko-plastické lomové mechaniky (EPLM), která uvažuje u kořene trhliny existenci velké plastické zóny, případně až úplné zplastizování nosného průřezu s trhlinou.

4.2.1. Lineární elastická lomová mechanika (LELM)

Lineární elastická lomová mechanika je nejstarší obor lomové mechaniky a tvoří základ všech pozdějších teorií lomové mechaniky. První teoretickou prací, věnovanou pevnosti tělesa s trhlinou, byl nejspíše článek K. Wieghardta z roku 1907. Tento průkopnický příspěvek, publikovaný v nepříliš sledovaném německém časopise, však bohužel zůstal dlouhá léta bez povšimnutí. Širší uplatnění našly až práce A.A. Griffitha, který v roce 1920 navrhl kritérium, umožňující posouzení stability trhliny v tělese na základě celkové energetické bilance. Výsledky

práci tohoto autora představují část základů, na kterých byla přibližně po 40 letech vybudována lomová mechanika jakožto samostatná vědní disciplína [28].

Pro řešení úloh zabývající se zatížení těles s trhlinou se používají v zásadě dva přístupy:

1. energetická analýza
2. napěťová analýza

ad 1) Energetická analýza zatíženého tělesa s trhlinou

Z energetické analýzy vychází Griffithovo kritérium stability trhliny. Griffithův model je založen na bilanci celkové energie – lom nastane v okamžiku, kdy uložená energie je dostatečná k překonání povrchové energie materiálu, resp. uvolněná elastická energie při šíření trhliny je schopna vyvolat vznik nových povrchů.

Griffith dále definoval napětí, při kterém dojde k lomu, pomocí rovnice (14):

$$\sigma_f = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot E \cdot \gamma_s}{\pi \cdot a}\right)} \quad (14)$$

kde: γ_s – práce vykonaná meziatomovými silami při vzniku nového povrchu
 a – délka trhliny v zatěžovaném tělese

Na Griffithovu práci nezávisle na sobě navázali Irwin a Orowan, kteří výraz (14) modifikovali i na materiály, které jsou schopny plastické deformace, viz rovnice (15).

$$\sigma_f = \sqrt{\left(\frac{2Ew_f}{\pi a}\right)} \quad (15)$$

kde $w_f = \gamma_s$ je energie porušených vazeb na jednotku plochy

V roce 1956 Irwin upravil Griffithův model tak, aby byl použitelný pro řešení technických problémů. Irwin definoval veličinu G jako „rychlost uvolňování energie“, která představuje energii potřebnou k velice malému (inkrementálnímu) přírůstku trhliny, viz rovnice (16).

$$G = -\frac{dW_{el}}{da} \quad (16)$$

kde W_{el} je elastická energie.

Veličina G se také nazývá „hnačí síla trhliny“ a je možné ji vyjádřit rovnicí (17).

$$G = \frac{\pi \sigma^2 a}{E} \quad \left[\frac{J}{m^2} = \frac{N}{m} \right] \quad (17)$$

Obecnou podmínku ztráty stability trhliny je možné přepsat do tvaru $G=R$, kde veličina R charakterizuje lomovou houževnatost materiálu a nazýváme ji odpor materiálu proti šíření trhliny. Je definována rovnicí (18).

$$R = \frac{dW_s}{dS_f} \quad (18)$$

Kies, spolupracovník Irwina v National Research Laboratory, zjistil při zkouškách těles s trhlinami z akrylové pryskyřice, že kritické napětí pro danou trhlinu závisí pouze na $G_C \cdot E$. Inženýři firmy Boeing, kteří byli iniciátory těchto pokusů, nazvali veličinu $\sqrt{G_C \cdot E}$ lomovou houževnatostí a na počest Kiese ji označili K_C .

Pro úplnost je třeba dodat, že do skupiny metod založených na energetické koncepci je možno dále zařadit metodu hustoty deformační energie a metodu J-integrálu, o které bude podrobně pojednáno dále v kapitole 4.4.

ad 2) Napěťová analýza zatíženého tělesa s trhlinou

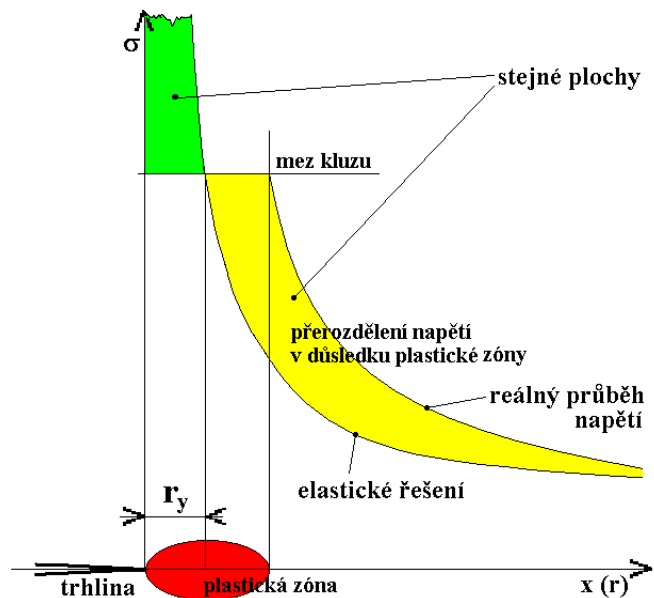
Teorie křehkého lomu navržená Griffithem je obtížně použitelná v konstruktérské praxi. Spočítat hnací sílu trhliny G pro trhlínu v zatížené součásti libovolného tvaru se nedařilo. Problém vyřešil Irwin, a to pomocí rozboru napjatosti na čele ostré trhliny. Odvodil analytické řešení velikosti složek napětí jako závislost na jediném parametru, nazvaném součinitel (faktor) intenzity napětí K . Kvůli jeho zásadnímu významu pro lomovou mechaniku mu je věnována samostatná kapitola 4.3 [33].

4.2.2. Elasticko-plastická lomová mechanika (EPLM)

Koncepce lineárně elastické lomové mechaniky (LELM) jsou platné pouze v případech, kdy nelineární deformace materiálu (a tedy i plastické deformace) se vyskytují pouze v malé oblasti u čela trhliny. K tomu může ovšem dojít pouze tehdy, je-li nominální napětí, vztažené k mezi kluzu, poměrně nízké. Nestabilní lomy běžných konstrukčních ocelí (nízké a střední pevnosti) tak mohou nastat pouze při velmi nízkých teplotách. Splnění podmínky rovinné deformace (RD) pak vyžaduje velikost tloušťek překračující tloušťky obvyklých konstrukčních prvků.

Ostrá únavová trhlína je silný koncentrátor napětí, poloměr zakřivení čela trhliny se blíží nule, a tudíž z teorie elasticity vyplývá, že napětí přímo v kořeni je nekonečně velké. To ovšem u reálného materiálu, který se může plasticky deformovat, nenastane a již při malém nominálním napětí se vytvoří před čelem trhliny plastická zóna. Předpokládáme-li materiál s výraznou mezi kluzu bez zpevnění, potom v celé plastické zóně bude dosaženo hodnoty meze kluzu. Vzhledem k rovnováze vnějších a vnitřních sil však musí dojít k přerozdělení napětí (viz **Obr. 15**) takže skutečný průběh napětí před čelem trhliny je jiný než předpokládá elastické řešení. Tím se při řešení dopouštíme chyby a nemá-li chyba překročit velikost cca 5%, musí platit, jak bylo experimentálně potvrzeno, rovnice (19).

$$B, a, (W - a) \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_{IC}}{R_e} \right)^2 \quad (19)$$



Obr. 15 Přerozdělení napětí před čelem trhliny v důsledku vytvoření plastické zóny [22]

Z rovnice (19) rovněž vyplývá omezení aplikovatelnosti lineární elastické lomové techniky vzhledem k rozměrům tělesa. Zkoušky velkých zkušebních těles (zejména v případě houževnatých materiálů) byly vedeny snahou splnit podmínky této rovnice.

Je proto pochopitelné, že byly hledány jiné koncepce, využitelné i za situace větších plastických deformací u čela trhliny. K popisu lomového chování materiálů, u kterých před porušením dochází k časově nezávislé plastické deformaci, se používá elasticko-plastická lomová mechanika.

Na základě rozvoje metod elasticko-plastické lomové mechaniky je možné hodnotit odolnost materiálů a součástí nejen vůči křehkému nestabilnímu lomu iniciovanému za přítomnosti omezených plastických deformací (což je v možnostech lineární elastické lomové mechaniky), ale také v oblasti větších plastických deformací na čele trhliny, a to jak při nestabilní štěpné, tak při stabilní tvárné iniciaci trhliny, tedy v podstatě v průběhu celé tranzitní křivky teplotní závislosti lomové houževnatosti. V oblasti většího rozvoje plastických deformací, kde aplikace klasického součinitele intenzity napětí, odvozeného z elastického pole napětí před čelem ostré trhliny, již nelze použít, jsou hlavními křehkolomovými charakteristikami:

1. Rozevření kořene tvárné trhliny δ_C (COD, Crack Opening Displacement, ev. CTOD, Crack Tip Opening Displacement, historicky starší koncepce)
2. J – integrál (novější koncepce, dnes velmi rozšířená)

Tyto koncepce se staly hlavními parametry, kterými lze v rámci elasticko-plastické lomové mechaniky charakterizovat odolnost materiálu vůči iniciaci trhliny při relativně vyšších teplotách a pro součásti menších tloušťek, kdy dochází k výraznému rozvoji plastických deformací, ať již následná iniciace lomu probíhá tvárným nebo štěpným mechanismem.

Oba související parametry – rozevření u čela trhliny i J -integrál – popisují podmínky u čela trhliny v elasto-plastickém materiálu a mohou být použity jako kritéria lomu. Kritické hodnoty δ_C a J_{IC} jsou mírou lomové houževnatosti téměř nezávislou na velikosti tělesa.

Koncepce kritického rozevření trhliny δ je založena na předpokladu, že šíření křehké trhliny a realizace nestabilního lomu se uskuteční tehdy, když na rozhraní mezi elasticky a plasticky deformovanou oblastí před čelem trhliny je dosaženo kritické hodnoty otevření trhliny δ_C .

Koncepce J_I (Riceho) integrálu je založena na energetické bilanci v okolí postupující trhliny. Pro dvourozměrný případ je J -integrál definován jako křivkový integrál po křivce obklopující čelo trhliny. Pro velký význam J -integrálu pro tuto práci mu je věnována samostatná kapitola 4.4 [22] [33] [34].

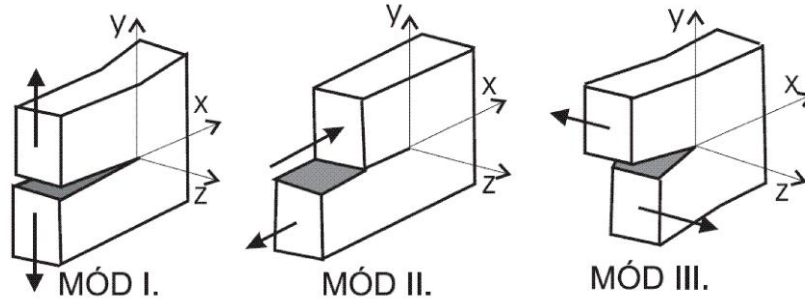
4.3. Součinitel intenzity napětí

Součinitel intenzity napětí je jednou z nejdůležitějších a v současné době i nejpoužívanějších mechanických veličin popisujících stav napjatosti v tělese s trhlinou. Pro tělesa konečných rozměrů s průchozí trhlinou se uvádí rovnice (20).

$$K_{I,II,III} = \sigma \sqrt{\pi \cdot a} \cdot Y \left(\frac{a}{W} \right) \quad (20)$$

Součinitel intenzity napětí je tedy funkcí působícího zatížení, velikosti (délky) trhliny a tvarové funkce, která charakterizuje tvar a velikost tělesa, velikost trhliny, její polohu v tělese a charakter působícího zatížení. Indexy I, II, III označují způsob zatížení tělesa s trhlinou. Mohou nastat tři základní typy (módy) zatížení, viz **Obr. 16**.

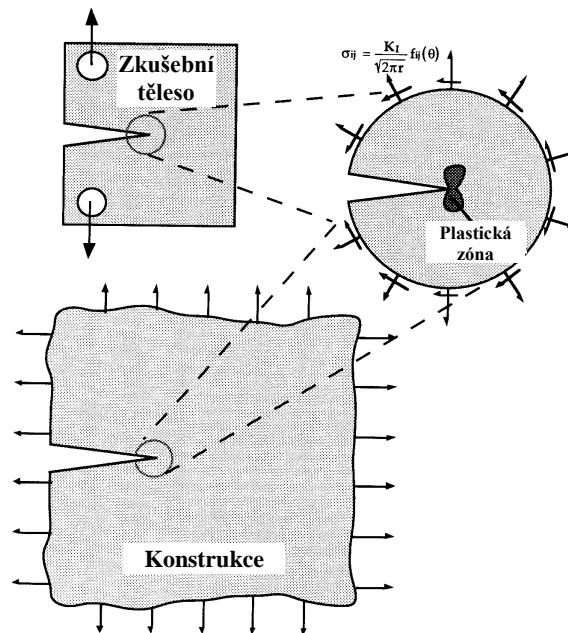
1. **Tahový mód I** (opening mode, tensile mode) je charakterizován vnější silou působící kolmo na rovinu lomu.
2. **Rovinný smykový mód II** (sliding mode, in-plane shear) je charakterizován vnějšími silami působícími ve směru šíření trhliny.
3. **Antirovinný smykový mód III** (tearing mode, anti-plane shear) je charakterizován orientací vnějších sil ve směru rovnoběžném s čelem trhliny.



Obr. 16 Módy pro různá zatížení těles s trhlinou [35]

Kombinací těchto tří základních typů zatížení lze popsat jakýkoliv praktický případ. Nicméně, mód I je v praxi nejčastější, protože reálná trhlina šířící se v materiálu únavovým procesem stáčí rovinu, ve které se šíří, do směru kolmého na směr působícího maximálního normálového napětí, tedy do módu I.

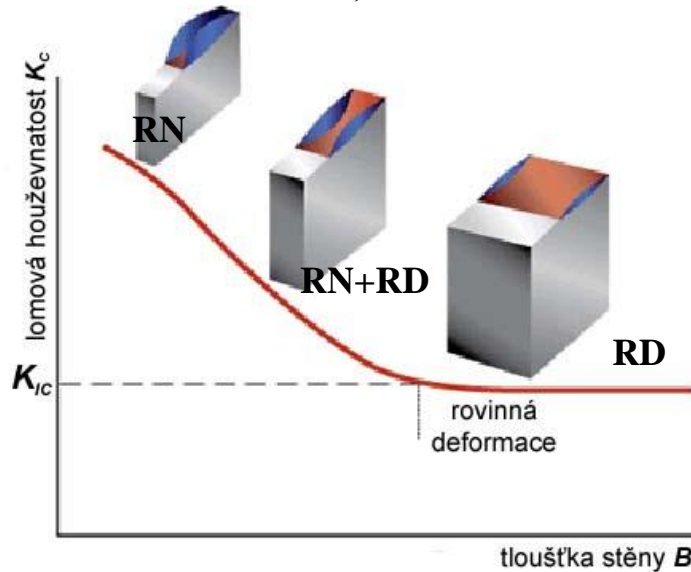
Mají-li tělesa různých geometrických tvarů, s různě dlouhými trhlinami, zatížená různým vnějším namáháním tentýž součinitel intenzity napětí, mají v okolí kořene trhliny i stejný vliv napjatosti (viz Obr. 17). Překročí-li součinitel intenzity napětí určitou kritickou hodnotu (obecně K_C), dochází k nestabilnímu šíření trhliny, tj. podmínku ztráty stability trhliny lze zapsat ve tvaru $K_I > K_C$.



Obr. 17 Zatěžovaný vzorek a reálná konstrukce se stejnou hodnotou K_I [36]

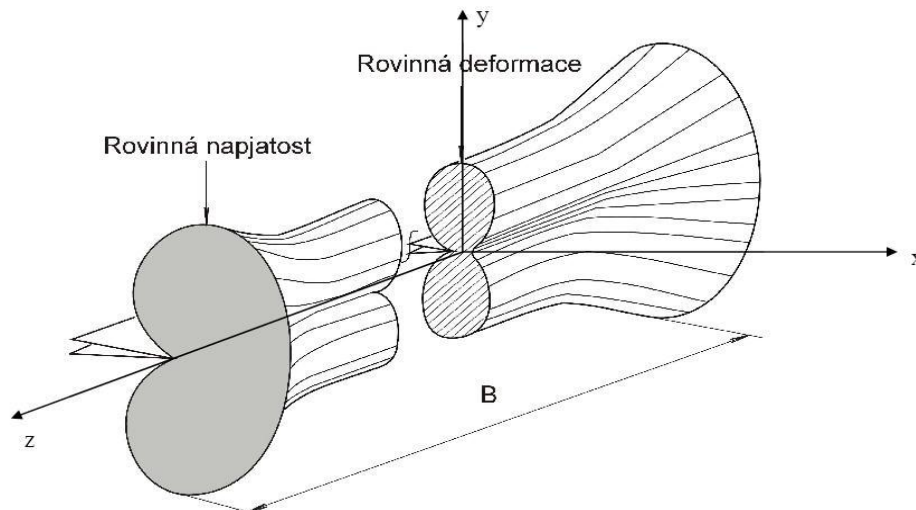
4.3.1. Vliv rozměrů zkušebního tělesa

Závislost lomové houževnatosti na rozměrech tělesa je v rozporu s požadavkem geometrické invariantnosti. Experimentálně bylo zjištěno, že hodnota lomové houževnatosti se může měnit zejména v závislosti na tloušťce tělesa, viz **Obr. 18**. U těles s malou tloušťkou bývá lomová houževnatost obvykle větší než u těles s větší tloušťkou. Při větších tloušťkách se již lomová houževnatost mění jen velmi málo a hodnoty K_C se asymptoticky blíží jisté minimální hodnotě K_{IC} , která charakterizuje lomovou houževnatost ve stavu rovinné deformace. Tato hodnota je pro daný mód zatěžování materiálovou charakteristikou, nezávislou na rozměrech tělesa.



Obr. 18 Vliv tloušťky součásti na hodnotu lomové houževnatosti K_C [34]

Na rozdíl od těles s větší tloušťkou je u tenkých těles značně omezen vliv trojosostii napětí, což usnadňuje plastickou deformaci, která trhlinu otupuje. S tím souvisí i změna stavu napjatosti – u těles malé tloušťky převažuje stav rovinné napjatosti (RN), ve kterém je velikost plastické zóny na čele trhliny asi 3x větší než za jinak stejných podmínek ve stavu rovinné deformace (RD), který převládá u těles s větší tloušťkou. Toto je prostorově znázorněno na **Obr. 19**



Obr. 19 Prostorové znázornění plastické zóny na čele trhliny [29]

4.4. J-Integrál

Dojde-li k plastické deformaci většího rozsahu, nelze kritéria LELM použít, neboť větší plastická zóna významně ovlivní stav napětí v okolí čela trhliny. **J**-integrál patří mezi energetická lomová kritéria EPLM a je zobecněním hnací síly trhliny **G**, jejíž výpočet vycházel z elastického řešení stavu napjatosti před čelem trhliny a jejíž použití bylo spojeno se splněním předpokladu malé plastické zóny na čele trhliny [37].

Eshelby [38] při výpočtu složek sil, působících na defekty a nehomogenity, nacházející se uvnitř určité plochy, na základě principu virtuálních prací odvodil, že:

a) hodnota křivkového integrálu, definovaného vztahem (21) nezávisí na integrační cestě v deformovaném tělese, tj. nezávisí na konkrétním tvaru křivky Γ .

$$J = \int_{\Gamma} \frac{dU}{dV} dy - (T_x \cdot \frac{\delta u}{\delta x} + (T_y \cdot \frac{\delta u}{\delta x} + T_z \cdot \frac{\delta w}{\delta x}) ds \quad (21)$$

b) v případě libovolné uzavřené křivky platí $J = 0$.

Symbole vystupující ve vztahu (21) mají následující význam:

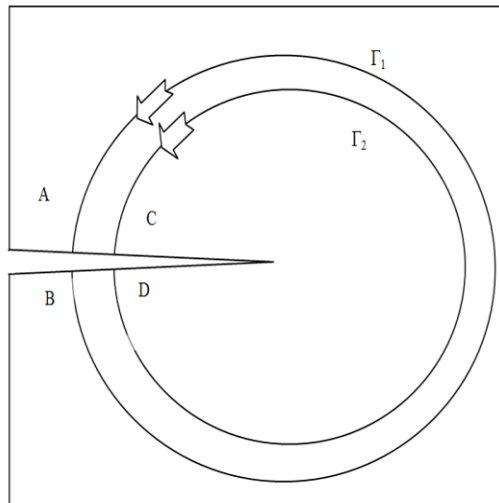
$$\frac{dU}{dV} = \int_0^{\varepsilon_{i,j}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \dots \dots \dots \quad \text{objemová hustota deformační energie (tj. deformační energie na}$$

objemovou jednotku materiálu, funkce hustoty deformační energie, resp. měrné deformační energie) [MPa=MJ/m³];

$$T_i = \sum_j \sigma_{ij} \cdot n_j \dots \dots \dots \text{i-tá složka vektoru povrchové tahové síly kolmé na křivku } \Gamma$$

kde $i, j = x, y, z$, n_j je j -tá složka jednotkového vektoru normály ke křivce Γ .

Uvedené poznatky aplikoval Rice [39][40] na problematiku trhlín (viz **Obr. 20**). Křivka, procházející body A, B, C a D je uzavřená a platí tedy pro ni $J = 0$. Líce trhliny (tj. úseky AC a BD) představují volný povrch, na kterém musí být splněny příslušné okrajové podmínky, tj. $T_i = 0$ ($i = x, y, z$) a $dy = 0$.



Obr. 20 Integrační oblasti pro výpočet J-integrálu [35]

Původně byl vztah (21) odvozen pro lineárně elastický materiál a umožňoval výpočet hnací síly trhliny G . Ukázalo se však, že J -integrál má význam hnací síly trhliny i v případě výskytu plastické deformace na čele trhliny. Místům, ve kterých není klasická elastická teorie kontinua aplikovatelná, se lze vyhnout – integrační křivku Γ zvolíme tak, aby procházela pouze elasticky deformovanými oblastmi vně plastické zóny. Konkrétní tvar integrační křivky optimalizujeme tak, aby procházela místy, ve kterých je vyšetření pole napětí a deformací nejjednodušší.

J -integrál obecně udává celkovou sílu ve směru osy x působící na všechny defekty a nehomogenity, nacházející se uvnitř křivky Γ . V daném případě je tedy J -integrál roven hnací síle, působící na trhlínu a plastickou zónu, pohybují-li se společně jako jediný "tuhý" objekt. Nezahrnuje však působení samotné plastické zóny a ztrácí svůj význam, jestliže se rozměr plastické zóny mění.

Potenciální energie tělesa s trhlínou je obecně dána rozdílem ($A_F - U$), kde A_F je práce vnějších sil působících na těleso a U je elastická deformační energie tělesa. Rice prokázal, že J -integrál vyjadřuje změnu potenciální energie v tělese v závislosti na délce trhliny a :

$$J = \frac{d}{da}(A_F - U) \quad (22)$$

V oboru platnosti lineární lomové mechaniky, tj. za předpokladu lineárně elastického materiálu, platí pro obecně smíšený mód namáhání vztahy:

$$J = G = G_I + G_{II} + G_{III} \quad (23)$$

$$\text{resp.} \quad J = \frac{1+\nu}{E} \cdot \left[(1-\nu) \cdot (K_I^2 - K_{II}^2) + K_{III}^2 \right] \quad \text{pro stav RD} \quad (24)$$

$$J = \frac{1}{E} \cdot \left[K_I^2 + K_{II}^2 + (1+\nu) \cdot K_{III}^2 \right] \quad \text{pro stav RN} \quad (25)$$

Transformační vztahy (24) a (25) umožňují nepřímé stanovení J -integrálu na základě výpočtu hodnot faktoru intenzity napětí $K_j = I, II, III$.

Kritérium stability trhliny lze pomocí J -integrálu vyjádřit v obecném tvaru $J_i < J_{ic}$ ($i = I, II, III$). Hlavní výhodou uvedeného kritéria je jeho aplikovatelnost i v případě větších plastických deformací. Toto kritérium je tedy mnohem universálnější, než kritérium vyjádřené pomocí hnací síly G [41].

4.5. Zkoušky lomové houževnatosti

Stanovení lomové houževnatosti charakterizované většinou parametry K_{IC} a J_{IC} se provádí experimentálně na zkušebních strojích dle příslušných norem. Jak bude ukázáno v experimentální části (např. v kapitole 6.4.5), použitá norma může mít zásadní vliv na vyhodnocené výsledky ze zkoušek lomové houževnatosti.

V této práci jsou všechny zkoušky lomové houževnatosti provedeny a vyhodnoceny podle americké normy *ASTM E1820 – 09* [8], proto bude nyní na tuto normu zaměřena pozornost. Jediná výjimka byla učiněna u materiálu označeného v experimentální části jako m19, kdy bylo provedeno vyhodnocení také podle mezinárodní normy *ISO 12135* [9]. Obě normy jsou používány pro vyhodnocení lomové houževnatosti v houževnaté oblasti porušování materiálu. Samotný experiment lze dle obou norem provádět shodně a vyhodnocení se v principu také shoduje. Nicméně se v několika bodech liší a tento rozdíl může vést k diametrálně odlišným

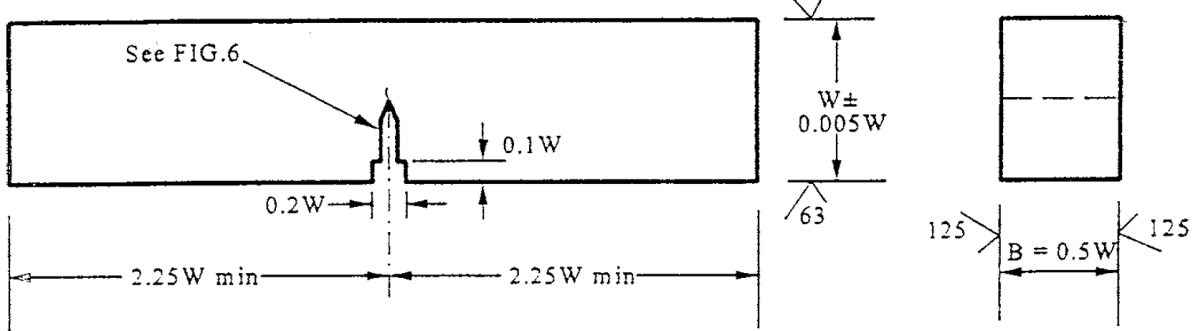
výsledkům lomové houževnatosti. Rozdíly v těchto normách jsou diskutovány a prakticky ukázány v experimentální části 6.4.5.

Norma *ASTM E1820* slouží pro vyhodnocení lomové houževnatosti pomocí parametrů **K**, **J** a **CTOD**. Zatěžování se provádí pro tahový mód I (viz **Obr. 16**). Houževnatost může být měřena ve formátu R-křivky nebo jako jediný parametr. Výběr parametru lomové houževnatosti je závislý na typu šíření trhliny; pro nestabilní šíření je použito hodnocení pomocí součinitele intenzity napětí **K_I** a pro stabilní šíření trhliny se sestavuje **J-R křivka**, ze které se pak vyhodnotí pomocí čáry otupení (*blunting line*, v normě nazývaná jako *construction line*) kritická hodnota J-integrálu **J_{IC}**. Hodnoty **K_{IC}**, resp. **J_{IC}** charakterizují lomovou houževnatost materiálu měřenou ve stavu rovinné deformace, po jejichž překročení se trhlina začne šířit nestabilně, resp. stabilně. Parametry **K_{IC}** a **J_{IC}** lze mezi sebou přepočítat.

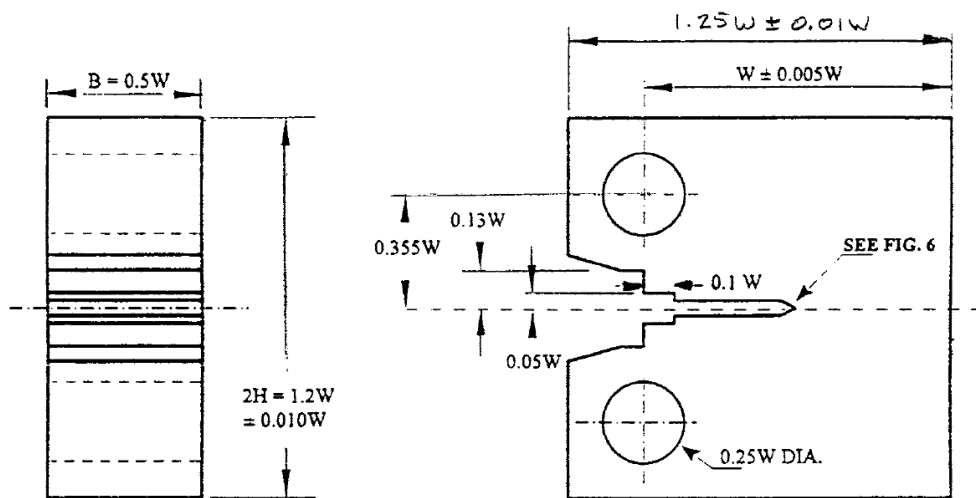
Normou *ASTM E1820* jsou doporučena tato zkušební tělesa:

1. Těleso SE(B) (single-edge bend specimen) pro tříbodový ohyb, v ČSN 42 0347 označeno jako těleso A, v literatuře je známé také jako 3PB (Three-point Bend) specimen
2. Tělesa 1T-CT (compact test specimen) a DCT (disk-shaped compact specimen) pro excentrický tah, v ČSN 42 0347 označena jako tělesa B a D

V této práci jsou použita tělesa SE(B) a 1T-CT (viz **Obr. 21** a **Obr. 22**). Rozměry těles jsou vztaheny k jednomu rozměru **W** (rozměr, v jehož směru se bude šířit lom). Základní charakteristikou je tloušťka tělesa **B**. Geometrická podobnost těles je důležitá pro parametr lomové houževnatosti. Obvykle se používají tělesa o tloušťce 25 mm.



Obr. 21 Těleso zatížené tříbodovým ohybem (SE(B) specimen) [8]



Obr. 22 Těleso zatížené excentrickým tahem (CT - Compact tension specimen) [8]

Zkušební tělesa jsou opatřena jednostranným vrubem, který může být buď přímý nebo lomený (angl. „chevron notch“). Na tělesech se pak nakmitá ostrá únavová trhlina. Norma uvádí, že by počet kmitů pro získání ostré únavové trhliny měl být v závislosti na tělese 10^4 - 10^6 cyklů. Délka únavové trhliny může být v mezích 0,45-0,75 pro měření J-integrálu, ale pro měření K_{IC} musí být v rozmezí jen 0,45-0,55W. Asymetrie cyklu má být $R_c=0,1$. Norma dále uvádí maximální hladinu K_{max} . V praxi se osvědčilo začínat z $K_{max}=25 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ a dokončovat kmitání trhliny s $K_{max}=18 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. Při těchto parametrech je zaručeno, že budou splněny požadavky normy. Po nakmitání únavové trhliny se tělesa obvykle opatří bočními vruby, které jsou hluboké $0,2B$ (tj. z každé strany 10% z tloušťky tělesa).

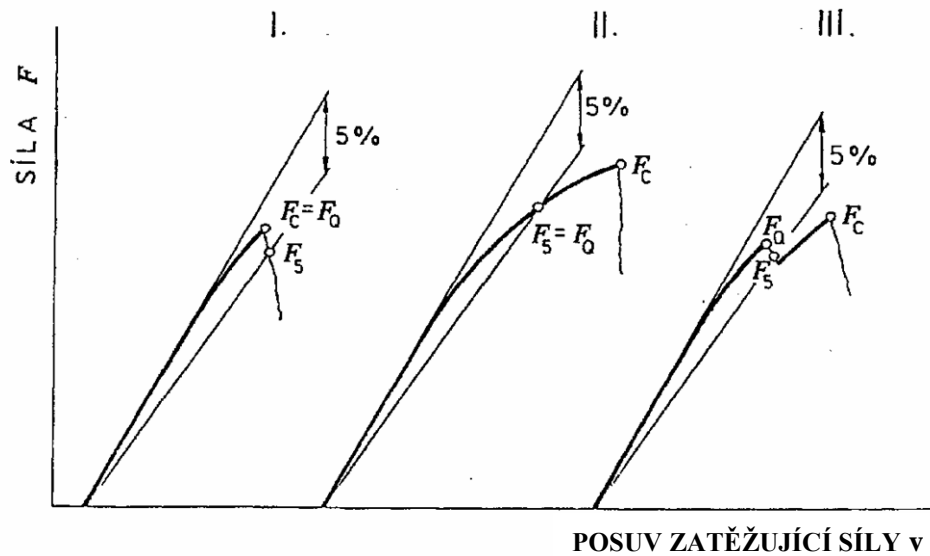
Při vlastní zkoušce lomové houževnatosti je snímána závislost zátěžné síly na rozevření trhliny. Rozevření se měří pomocí sponového snímače, pro který se také používá označení COD extenzometr, viz **Obr. 23**. Zatěžování zkušebního tělesa se provádí konstantní rychlostí tak, aby se maximální síly F_m dosáhlo za 0,3 – 3min. Dle následného charakteru šíření trhliny se pro vyhodnocení lomové houževnatosti zvolí vhodný parametr. Při nestabilním (křehkém) šíření trhliny se pro vyhodnocení použije parametr K (součinitel intenzity napětí), při tvárném šíření se obvykle sestaví *J-R křivka*, ze které se vyhodnotí hodnota J_Q . Při splnění všech podmínek daných normou můžeme tyto parametry vyhodnotit jako K_{IC} a J_{IC} , tj. parametry, které jsou měřeny za podmínek rovinné deformace a můžeme s nimi dále pracovat jako s materiálovými konstantami. Způsobem vyhodnocení těchto parametrů se zabývají podkapitoly **4.5.1** a **4.5.2**.



Obr. 23 Uspořádání zkoušky lomové houževnatosti

4.5.1. Měření lomové houževnatosti K_{IC} ve stavu rovinné deformace

Při vlastních zkouškách lomové houževnatosti se získá závislost síly na rozevření vrubu. Zatěžuje se konstantním posuvem na zkušební stroji až do křehkého porušení zkušebního tělesa. Při zatěžování se mohou objevit 3 různé typy závislostí (viz **Obr. 24**). Sílu F_Q , ze které se pak počítá hodnota lomové houževnatosti, určíme tak, že z počátku souřadnic vedeme přímku svírající s osou v úhel α , jehož tangenta je o 5% menší než tangenta lineární části záznamu $F=F(v)$. Síla F_Q je pak definována následujícím způsobem: Pokud je síla v každém bodě, která předchází průsečíku F_5 , menší než F_5 , pak $P_5=F_Q$ (typ II). Pokud ale na záznamu existuje maximální síla před F_5 , pak tato maximální síla je rovna F_Q (typ I a III).



Obr. 24 Typy závislosti zátěžné síly F na posuvu v [1]

Po splnění dalších podmínek daných normou můžeme z této síly vypočítat K_{IC} . Pro výpočet lomové houževnatosti je dále nezbytné stanovit délku trhliny, která odpovídá rozhraní mezi únavovou a statickou částí. Čelo trhliny nemívá tvar přímky, ale rovinné či prostorové křivky. V blízkosti bočních povrchů bývá trhlina nejkratší a uprostřed tělesa nejdelší, a proto je třeba nějak definovat způsob měření trhliny. Norma doporučuje měřit trhlinu v devíti stejně od sebe vzdálených bodech, přičemž dva krajní body jsou vzdáleny od povrchu $0,005 W$ (viz Obr. 25). Z těchto měření se pak pomocí průměru vypočte fyzická délka trhliny a_p . Dle normy ASTM E1820 [8] se součinitel intenzity napětí vypočte pomocí rovnic (26) - (29).

1. Těleso zatížené tříbodovým ohybem (SE(B) specimen)

$$K = \left[\frac{F_Q \cdot S_p}{(BB_N)^{0,5} W^{1,5}} \right] f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (26)$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3\left(\frac{a}{W}\right)^{0,5} \left[1,99 - \left(\frac{a}{W}\right) \left(1 - \left(\frac{a}{W}\right)\right) \cdot \left(2,15 - 3,93\left(\frac{a}{W}\right) + 2,7\left(\frac{a}{W}\right)^2 \right) \right]}{2\left(1 + 2\left(\frac{a}{W}\right)\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{a}{W}\right)\right)^{1,5}} \quad (27)$$

2. Těleso zatížené excentrickým tahem (CT - compact test)

$$K = \left[\frac{F_Q}{(BB_N W)^{0,5}} \right] f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (28)$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{\left[\left(2 + \frac{a}{W}\right) \left(0,886 + 4,64\left(\frac{a}{W}\right) - 13,32\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14,72\left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5,6\left(\frac{a}{W}\right)^4 \right) \right]}{\left(1 + \left(\frac{a}{W}\right)\right)^{1,5}} \quad (29)$$

Pokud pro takto stanovenou hodnotu součinitele intenzity napětí, kterou norma označuje jako K_Q , platí rovnice (30), pak můžeme psát $K_Q=K_{IC}$.

$$B, a, (W - a) \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_{IC}}{R_e} \right)^2 \quad (30)$$

Není-li tomu tak, je třeba při dalších experimentech zvětšit příslušné rozměry zkušebních tyč nebo pro hodnocení lomové houževnatosti použít jiný parametr lomové mechaniky.

4.5.2. Stanovení hodnoty lomové houževnatosti J_{IC}

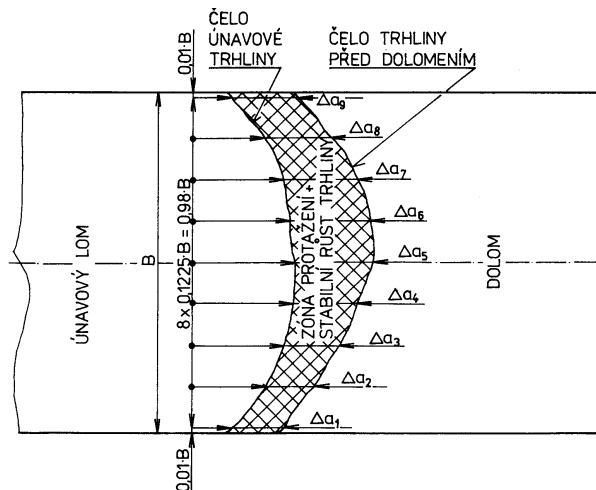
V případě, že během zkoušky dochází k iniciaci a růstu tvárné trhliny (stabilnímu růstu trhliny), je cílem zkoušky získat závislost veličiny J na přírůstcích trhliny Δa , tedy průběh J - R křivky. Z tohoto průběhu se určí hodnota J_Q jako průsečík J - R křivky a čáry otupení posunutá v grafu o 0,2mm. Hodnota J_Q se opět, po splnění kritérií daných normou, rovná lomové houževnatosti materiálu J_{IC} . Postup měření lomové houževnatosti pomocí J -integrálu je de facto stejný jako v kapitole 4.5.1 a od měření součinitele intenzity napětí se liší zejména ve způsobu vyhodnocení. Podle způsobu, jakým se určují závislosti Δa na J , hovoříme o metodě několika těles a o metodě jednoho tělesa (v angličtině se lze setkat s výrazem Multiple and Single-Specimen Methods).

4.5.2.1 Stanovení J_{IC} na několika zkušebních tělesech

Každé těleso ze souboru těles (obvykle 6-10ks) s nacyklovanou trhlinou zatěžujeme na jinou úroveň síly a odtížíme. Toto vyvolá nárůst trhliny v tělese o Δa . Tento přírůstek délky trhliny se před dolomením zkušebního tělesa vyznačí a zviditelní na lomové ploše prostřednictvím tzv. značkování. U zkušebních těles z oceli se používá nejčastěji značkování pomocí změny teploty, tj. žiháním. Ohřev na vhodnou teplotu (podle typu oceli) po určitou dobu způsobí oxidaci lomové plochy, což vyvolá barevný kontrast, umožňující stanovení Δa .

Po ochlazení zkušebního tělesa na teplotu tekutého dusíku a dolomení zbytkového nosného průřezu se hodnota Δa_i určí fraktograficky jako průměrná hodnota z několika měření. Délka trhliny se stanoví měřením v 9 místech lomové plochy (viz Obr. 25) a výsledná hodnota Δa_i se vypočte pomocí vztahu (31).

$$\Delta a_i = \frac{1}{8} \left[\frac{\Delta a_{i1} + \Delta a_{i9}}{2} + \sum_{j=2}^8 \Delta a_{ij} \right] \quad (31)$$



Obr. 25 Měření délky trhliny zkušebního tělesa po zkoušce LH [28]

Hodnoty J-integrálu pro každé zkušební těleso určíme pomocí vztahu z křivky závislosti $F = F(v)$. Pro účely výpočtu J-integrálu ze záznamu rozložíme tento záznam na elastickou a plastickou část, viz **Obr. 26**.

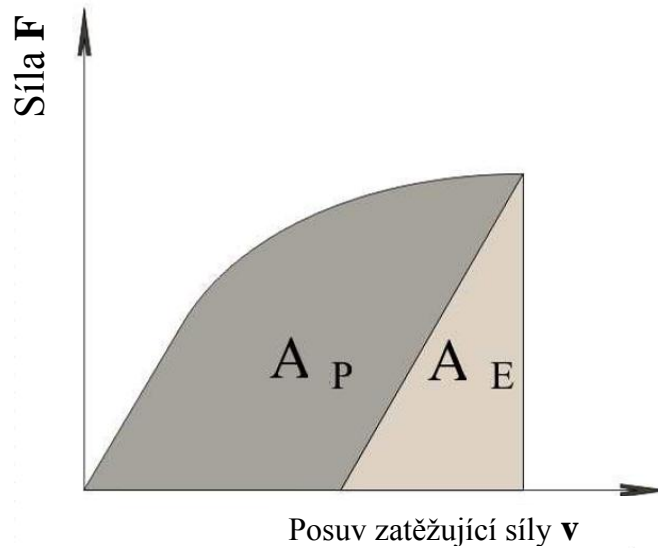
J-integrál vypočteme dle vztahů (32) a (33). Pro těleso SE(B) pro tříbodový ohyb použijeme dále vztahy (26), (27), (34) a pro CT těleso zatěžované excentrickým tahem použijeme vztahy (28), (29) a (35).

$$J_c = J_{el} + J_{pl} \quad (32)$$

$$J_{el} = \frac{K^2(1-\nu^2)}{E} \quad (33)$$

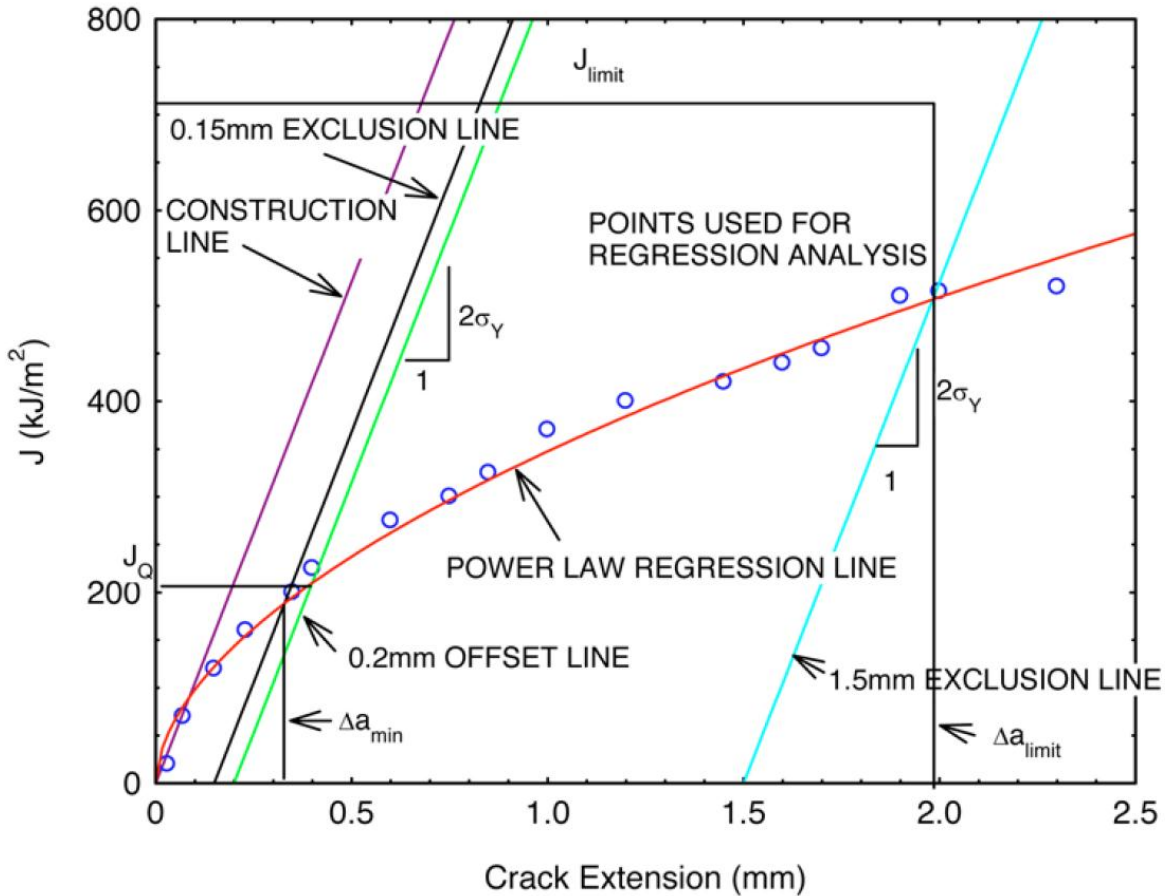
$$J_{pl(SE(B))} = \left[\frac{1,9 \cdot A_{pl}}{b_0 \cdot B_N} \right] \quad (34)$$

$$J_{pl(CT)} = \left[\frac{\left(2 + 0,522 \frac{b_0}{W} \right) \cdot A_{pl}}{b_0 \cdot B_N} \right] \quad (35)$$



Obr. 26 Záznam síla-posunutí rozdělený na elastickou a plastickou část [29]

Takto stanovené hodnoty J_i vyneseme v závislosti na Δa_i a těmito experimentálními body proložíme regresní křivku ve tvaru rovnice (36). Sklon tzv. „Construction line“ na **Obr. 27** (nebo-li také „blunting line“ či „čára otupení“ je dle *ASTM E1820-09* [8] dán vztahem (37), kde $M=2$ (popř. může být M určeno z experimentálních dat) a σ_y se vypočte dle rovnice (38). Průsečík regresní křivky („Power law regression line“) a rovnoběžky s čarou otupení posunutě o 0,2mm (0.2mm offset line) tvoří provizorní hodnotu J-integrálu, která, při splnění řady podmínek daných normou [8], se stává lomovou houževnatostí materiálu.



Obr. 27 Konstrukce J-R křivky s vyhodnocením bodu J_Q [8]

$$J = C_1 \cdot \left(\frac{\Delta a}{k} \right)^{C_2} \quad (36)$$

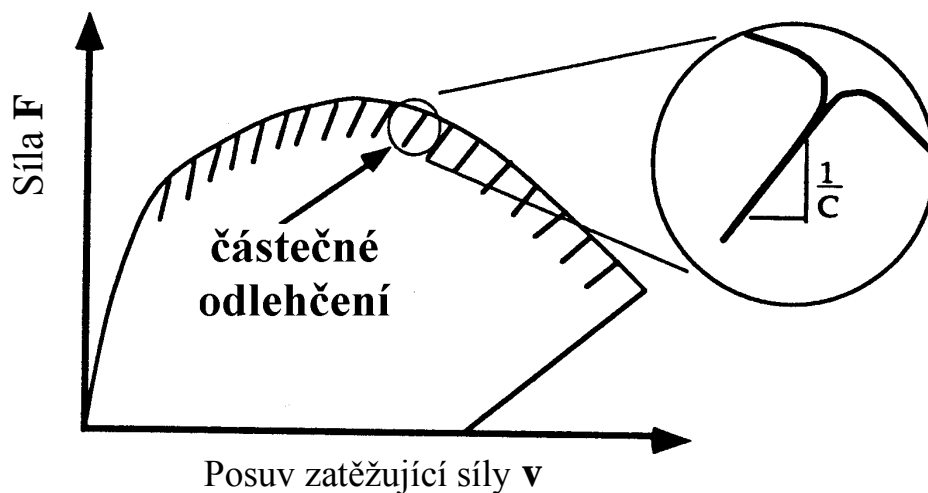
$$J = M \sigma_y \Delta a \quad (37)$$

$$\sigma_y = \frac{R_e + R_m}{2} \quad (38)$$

4.5.2.2 Stanovení J_{IC} na jednom zkušebním tělese

Metoda jednoho tělesa vyžaduje spolehlivé měření délky trhliny v průběhu zatěžování. K tomu se mohou použít elektropotenciálové metody, metody akustické emise, metody založené na měření změny poddajnosti tělesa (komplianční metoda - UC), apod. V experimentální části je z této škály metod využita metoda UC, která je založena na vztahu poddajnosti tělesa a délky trhliny, jak je schematicky ukázáno na Obr. 28. Zatěžování tělesa je během zkoušky několikrát přerušeno a provedeno částečné odlehčení (např. 20% z aktuální síly) a pokračuje se v zatěžování. Při odlehčení se vyhodnocuje poddajnost 1/C tělesa. V případě, že dochází k růstu trhliny, roste poddajnost tělesa (tuhost klesá). Jsou známy polynomické vztahy pro typy těles standardizované normou [8], které dávají do relace (a₀/W) a poddajnost. Tato metoda určení J-R křivky je označována jako metoda přímá. Metody jednoho tělesa jsou technicky velmi náročné. Jejich praktické použití je možné pouze v laboratořích vybavených zkušebním strojem řízeným

počítačem a příslušným programovým vybavením. Zjištěná závislost $J/\Delta a$ se zpracuje do J-R křivky, ze které je opět možno vyhodnotit J_Q , potažmo J_{IC} shodným způsobem jako u metody měření na více vzorcích.



Obr. 28 Princip určení J-R křivky na jednom tělese pomocí měření změny poddajnosti [42]

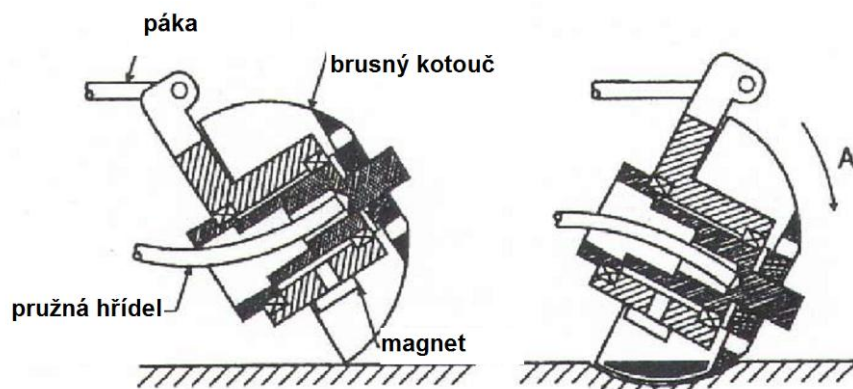
5. Zkoušky miniaturních těles

V rámci mechanického zkoušení pomocí miniaturních těles je v této práci největší pozornost věnována metodě SPT, která je dosud jednou z nejčastěji prováděných metod zkoušení na miniaturních tělesech. Dalšími diskutovanými metodami jsou M-TT a zkouška rázem v ohybu na mini-Charpy tělesech. Všechny tři zmíněné zkoušky lze potenciálně provést pomocí malého množství experimentálního materiálu odebraného odběrovým zařízením EDSE popsaným v kapitole 5.1.

5.1. Odběr materiálu z provozovaných komponent zařízení

Při hodnocení zbytkové životnosti provozovaných zařízení je hlavním požadavkem to, aby při odběru nedošlo k ovlivnění součásti a nenarušilo to její integritu, a také, aby vlastnosti materiálu zkušebních těles nebyly ovlivněny procesem odběru. K tomu slouží např. historicky starší odběrové zařízení SSamTM-2 firmy Rolls-Royce [5] nebo modernější zařízení EDSE [6] [7].

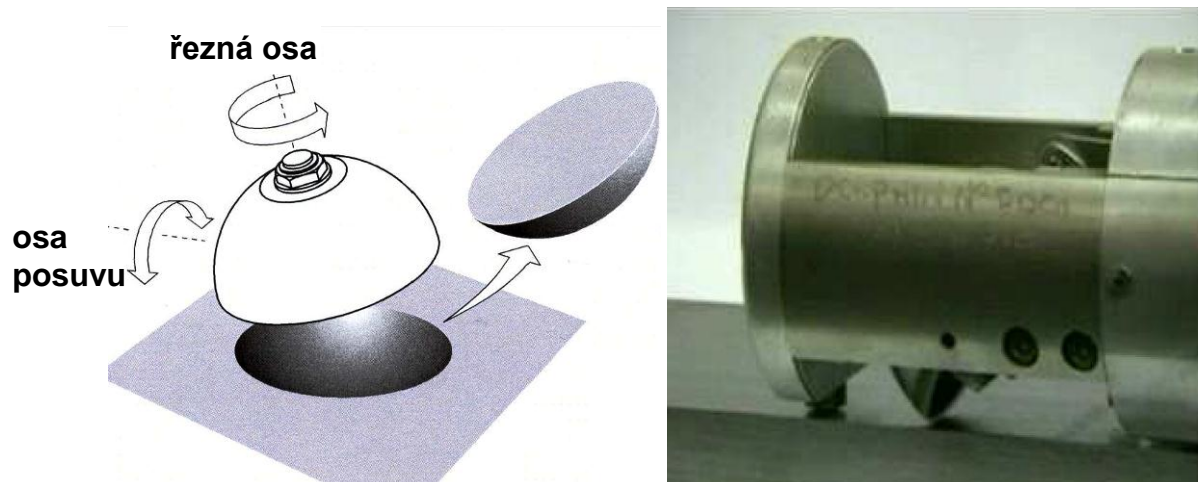
Zařízení SSamTM-2 je vyobrazeno na **Obr. 29** a **Obr. 30**. Toto zařízení vlastní např. VÍTKOVICE-Výzkum a vývoj, spol. s.r.o. [43]. Odběr vzorku je založen na odbroušení mezivrstvy mezi vzorkem a součástí pomocí rotujícího nástroje tvaru kloboučku o tloušťce cca 0,7 mm a průměru 50 mm (viz **Obr. 31**).



Obr. 29 Schematické znázornění odběru vzorků pomocí zařízení SSamTM-2 [5]

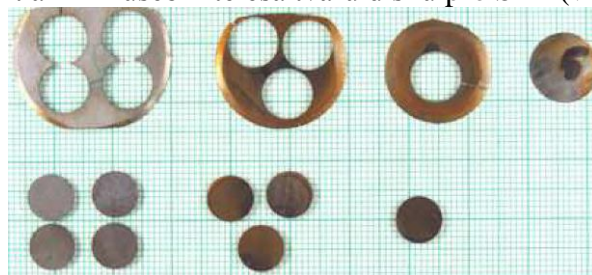


Obr. 30 Odběrové zařízení SSamTM-2 [5]



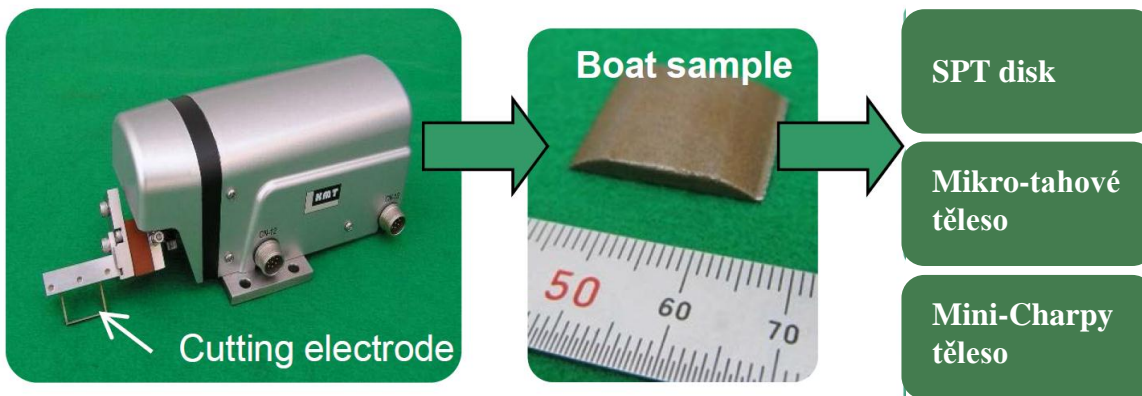
Obr. 31 Princip odběru vzorku materiálu pomocí odběrového zařízení SSamTM-2 [5]

Celý proces odběru, trvající asi 1 až 3 hod., umožní získat vzorek ve tvaru kulového vrchlíku o průměru cca 25 mm a výšce 3 až 4 mm. Absence tepelného a deformačního ovlivnění u odebraného vzorku i testované součásti je zajištěna vysokou obvodovou rychlostí nástroje, pomalým posuvem do záběru a intenzivním chlazením chladicí vodou. Z odebraného vzorku materiálu je možno připravit až 4 zkušební tělesa tvaru disku pro SPT (viz **Obr. 32**).



Obr. 32 Disky pro testy SPT odebrané ze zkušebního materiálu [44]

Nově je také možno použít odběrové zařízení EDSE (Electrical Discharge Sampling Equipment) vyvinuté v Japonsku [2] a aktuálně nabízeného společností European Technology Development Ltd [7]. Toto zařízení využívá pro odběr materiálu elektrojiskrové obrábění. Řezací elektroda je v rozích zaoblena a není tak potřeba vzniklou dutinu obvykle opravovat. Velikost odebraného vzorku závisí na použité elektrodě a nastavení hloubky odběru, nicméně standardní vzorek má rozměr 20x25x3 mm. COMTES FHT a.s. disponuje tímto zařízením a proto bylo přednostně uvažováno s použitím experimentálního materiálu odebíraného pomocí EDSE. Z odebraného vzorku lze vyrobit několik miniaturních těles pro různé typy zkoušek, viz **Obr. 33**. SPT disk i mikro-tahové těleso lze v rámci odebraného materiálu vyrobit v celé velikosti, pro mini-Charpy těleso je třeba navařit (bez tepelného ovlivnění) oba konce pro dosažení délky 27 mm a poté je již možno toto těleso zkoušet standardním způsobem. Příklad odběru v laboratořích COMTES FHT a.s. je vyobrazen na **Obr. 34a**. Hloubka ovlivněné vrstvy na metalografickém výbrusu, která činí řádově 15 μm , je znázorněna na **Obr. 34b**.



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



Obr. 34 a) Odebraný vzorek pomocí EDSE

b) Hloubka ovlivněné vrstvy

5.2. Small Punch Test

Potřeba vyhodnocovat aktuální mechanické vlastnosti provozovaných zařízení vedla k navržení nových testovacích metod na miniaturních tělesech [45]. Jednou z nich, která je v současné době nejrozšířenější, je metoda Small Punch Test (SPT) a v české literatuře (např. [43][46]) se též označuje jako protlačovací či penetrační test nebo také metoda malých vzorků.

5.2.1. Vznik metody Small Punch Testu

Metoda Small Punch Test byla navržena a vyvinuta v USA na MIT (Massachusetts Institute of Technology) a poprvé ji představil Manahan v roce 1981. Účelem této metody bylo zkoumání radiačního zkrěhnutí materiálů používaných v jaderných elektrárnách vystavených radiaci a zvýšeným teplotám [47].

K velkému vývoji této metody došlo v Japonsku, kde na této metodě pracovali zejména Mao, Takahashi a kol.[48]. Dále probíhaly práce, které se snažily určit přechodovou teplotu $FATT_{50}$ a lomovou houževnatost [49]. Výzkum této metody probíhal a stále probíhá na poli únavových a creepových vlastností a stále více se rozšiřuje i analytický přístup, který používá metody konečných prvků a také metodu neuronových sítí.

Vzhledem k tomu, že výsledky SPT nejsou přímo převoditelné na hodnoty ze standardních zkoušek, bylo nutné sjednotit podmínky zkoušení - zejména geometrii přípravku a zkušebního disku, neboť na výsledky zkoušek mají zásadní vliv. První pokusy o standardizaci těchto zkoušek

byly učiněny a publikovány na JAERI (Japanese Atomic Energy Research Institute) v roce 1988. Od roku 1992 je tato metoda známa i v Evropě, kde ji představila Swansea University ve Walesu a dále pak CISE (nyní CESI) v Itálii. V současné době je vypracován postup, který sjednocuje podmínky zkoušení této metody. V září roku 2004 inicioval Evropský výbor pro normalizaci (CEN) vznik dokumentu CWA 15627 (CEN Workshop Agreement): „Small Punch Test Method for Metallic Materials“ [10].

CWA je technická dohoda v rámci CEN a vlastněná CEN jako publikace, která odráží konsenzus konkrétních expertů a organizací odpovědných za její obsah. CWA proto reprezentuje nižší úroveň konsenzu, než jakou představuje evropská norma. Konečná verze tohoto dokumentu byla publikována v prosinci roku 2007.

5.2.2. Výhody a nevýhody SPT

Jak již bylo řečeno, standardní mechanické zkoušky potřebují velmi mnoho cenného experimentálního materiálu na výrobu zkušebních těles. V případě odběru např. z tlakových nádob z jaderných reaktorů, ve kterých je umístěno jaderné palivo, zde nastává další problém s vysokými hodnotami záření standardních zkušebních těles [50]. SPT vyhovuje současnému trendu, kterým je co největší miniaturizace zkušebních těles při současném zachování požadované přesnosti a věrohodnosti výsledků.

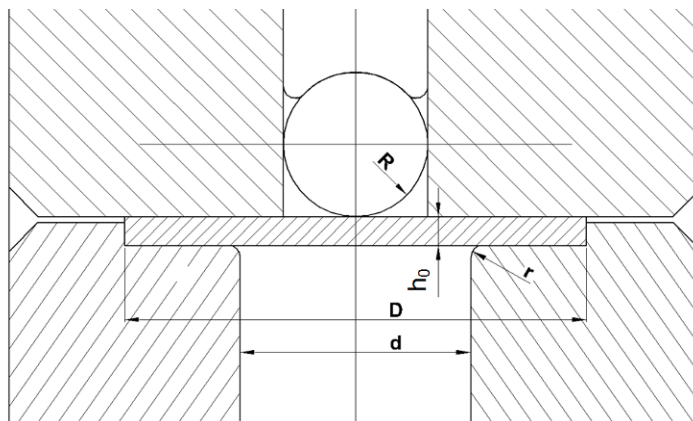
Největší výhody SPT jsou:

- nízká spotřeba experimentálního materiálu
- relativně jednoduché vyhodnocování výsledků zkoušek
- použití univerzálních a jednoduchých zkušebních zařízení
- uniformita těles pro všechny určované vlastnosti materiálů
- nízká aktivita ozářených těles
- výběr zkušebních těles z lokalizovaných oblastí a možnost určit lokální mechanické vlastnosti (např. zkoušení vzorku po fyzikální simulaci či při hodnocení objemových materiálů s nanostrukturou vyrobených metodami velké plastické deformace [4])

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

5.2.3. Princip a postup zkoušení

Princip SPT je vtlačování kuličky (popř. razníku s hemisférickou plochou) do plochého zkušebního tělesa ve tvaru disku (popř. ploché destičky), který je uchycen mezi horním přídržovačem a dolní matricí. Rychlost posuvu pístu je během celé zkoušky konstantní a zaznamenává se síla a deformace (posuv zatěžující síly). Příklad použitého přípravku navrženého dle CWA 15627 je znázorněn na **Obr. 35.** a uspořádání zkoušky je vyobrazeno na **Obr. 36.** Charakteristické rozměry přípravku a zkušebního tělesa jsou uvedeny v **Tab. 1.**



Obr. 35 Přípravek pro zkoušky SPT

Tab. 1 Charakteristické rozměry přípravku a zkušebního disku pro zkoušky SPT

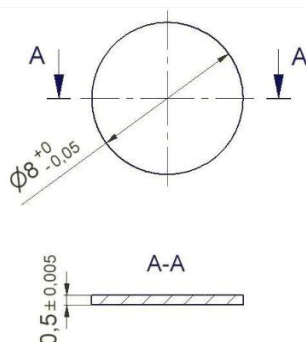
h_0	D	R	r	d
0,5	8,0	1,25	0,5	4,0



Obr. 36 Schéma uspořádání SPT

5.2.3.1 Výroba zkušebních těles

Doporučená geometrie zkušebních těles (disků) je uvedena na **Obr. 37**. Zkušební disky je možno vyrábět ze standardních testovacích materiálů, např. z válcovaných polotovarů či tyčí. Pro výzkumné účely je výhodné z daného materiálu vyrobit tyčinku o průměru 8 mm a z ní pak s přídavkem nařezat požadovaná tělesa. Minimální doporučený přídavek je $1,1 \cdot h_0$. Pro úplnost je třeba zmínit, že některé laboratoře používají zkušební tělesa jiná, např. ve formě destiček 10x10x0,5 mm, ale v této práci bylo testováno jen těleso ve tvaru disku.



Obr. 37 Zkušební disk používaný pro zkoušky SPT

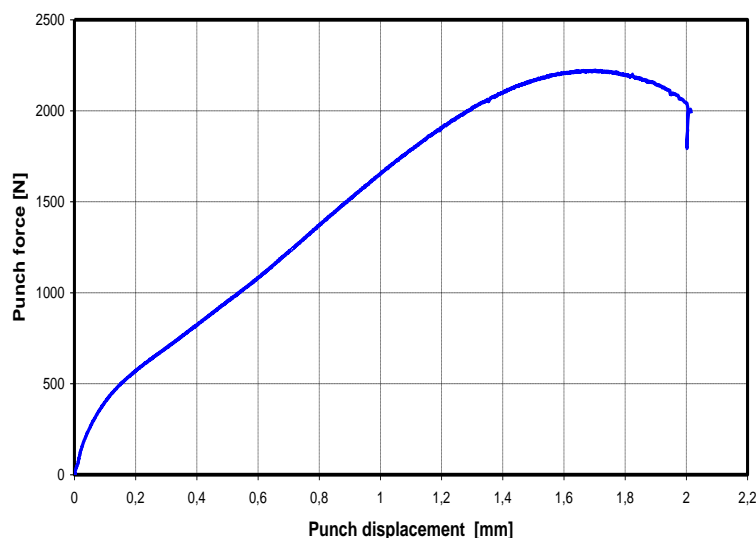
Další možností výroby je odebrání materiálu přímo z komponent strojních zařízení, např. z parovodů nebo turbín. Touto problematikou se zabývá kapitola 5.1.

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

5.2.3.2 Postup zkoušení

Zkušební disk, který odpovídá výrobním tolerancím, se vloží do zkušebního přípravku, viz **Obr. 35**. Přítlačná síla v přípravku není v dokumentu CWA 15627 jednoznačně definována, avšak na výslednou křivku může mít vliv. Tento problém lze vyřešit např. použitím momentového klíče při utahování a tím zajistit stejný přítlak pro všechny prováděné testy.

Rychlost zatěžování (tj. rychlost posuvu pístu) je doporučena v rozmezí 0,2-2 mm/min. V praxi se často užívá rychlost 0,5 mm/min. Při samotné zkoušce se pak počítačově zaznamenává posuv měřený extenzometrem nebo pístem a síla. Příklad takového záznamu je znázorněn na **Obr. 38**.

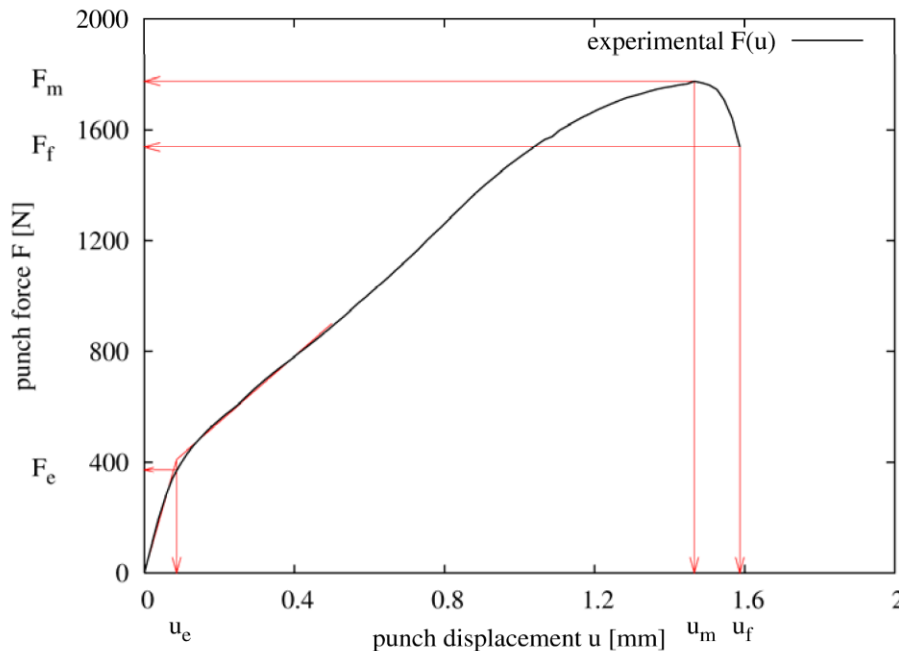


Obr. 38 Záznam SPT pro nízkouhlíkovou ocel

5.2.4. Vyhodnocení zkoušky SPT

Cíl SPT je získání deformační a silové křivky, která nese informaci o elasto-plastické deformaci a pevnostních charakteristikách materiálu. Pro vyhodnocení konvenčních mechanických charakteristik (tahových vlastností, přechodové křivky mezi houževnatým a křehkým lomem a lomové houževnatosti) jsou ze získaného záznamu (viz **Obr. 39**) vyhodnocovány následující charakteristiky:

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

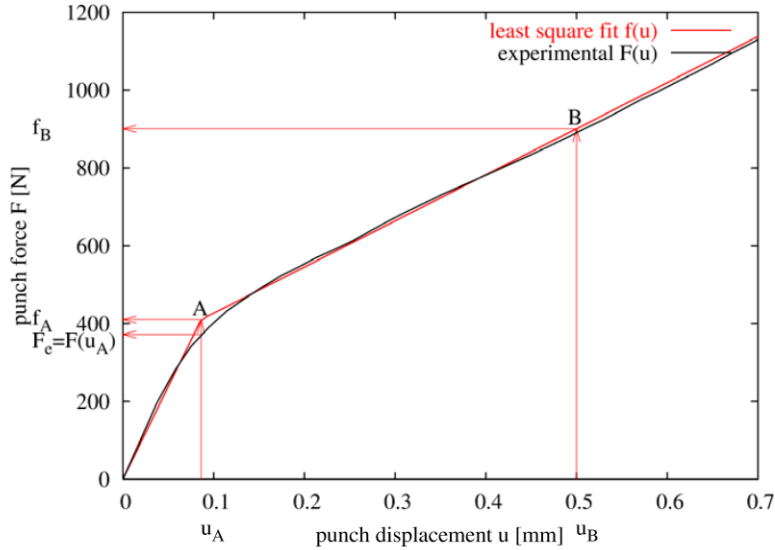


Obr. 39 Charakteristický záznam pro SPT s vyznačenými body pro vyhodnocení [10]

5.2.4.1 Vyhodnocení přechodu z lineárního stavu do plastického stavu

Hodnotu F_e charakterizující přechod z lineárního stavu do plastického stavu je možno korelovat s mezí kluzu $R_e/R_{p0,2}$ získanou ze zkoušky tahem a proto bude věnována zvláštní pozornost metodě určující tuto hodnotu. Dokument CWA 15627 určuje proceduru, jak přechodovou sílu F_e získat. Ze závislosti síla-posunutí obdržíme křivku $F(u)$, viz **Obr. 40**. Bilineární funkce $f(u)$ z originální funkce je mezi body A a B na **Obr. 40** definována vztahem (39). Pro minimalizaci odchylky je pak použit vztah (40).

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



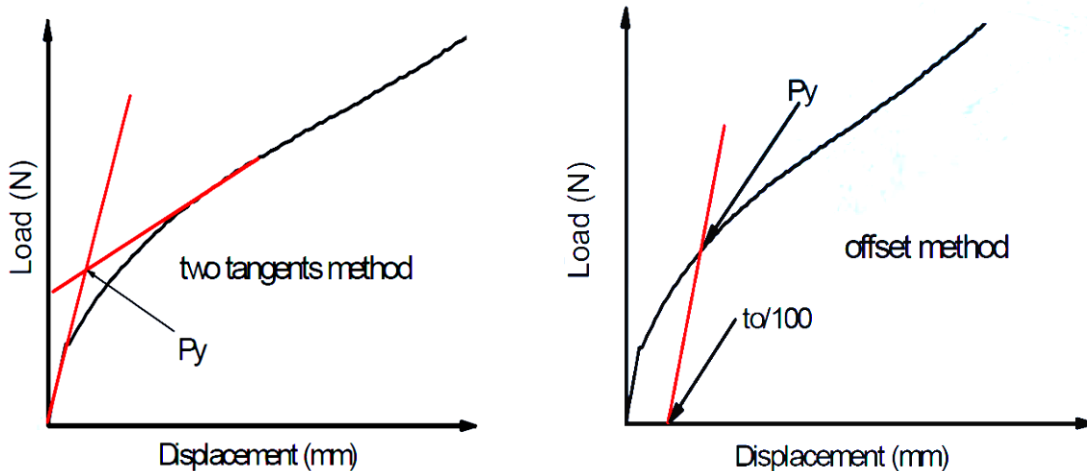
Obr. 40 Experimentální křivka $F(u)$ a proložená bilineární funkce $f(u)$ [10]

$$f(u) = \begin{cases} \frac{f_A}{u_A} u & \text{pro } 0 \leq u < u_A \\ \frac{f_B - f_A}{u_B - u_A} (u - u_A) + f_A & \text{pro } u_A \leq u \leq u_B \end{cases} \quad (39)$$

$$err = \int_0^{u_B} [F(u) - f(u)]^2 du \quad (40)$$

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

Na tomto místě je nutno podotknout, že v mnoha odborných člancích (např. [43], [51]) se setkáváme s vyhodnocením bodu F_e jako hodnotou v průsečíku obou tečen (viz **Obr. 41**, místo značení F_e je zde použito P_y) nebo jako průsečík počáteční přímky offsetovaný o hodnotu $h_0/100$ (zde je tloušťka disku označena t_0). Tento přístup může znamenat rozdíl hodnot v řádu několik desítek N.



Obr. 41 Alternativní přístup vyhodnocení F_e [51]

5.2.4.2 Vyhodnocení lomové energie při SPT

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

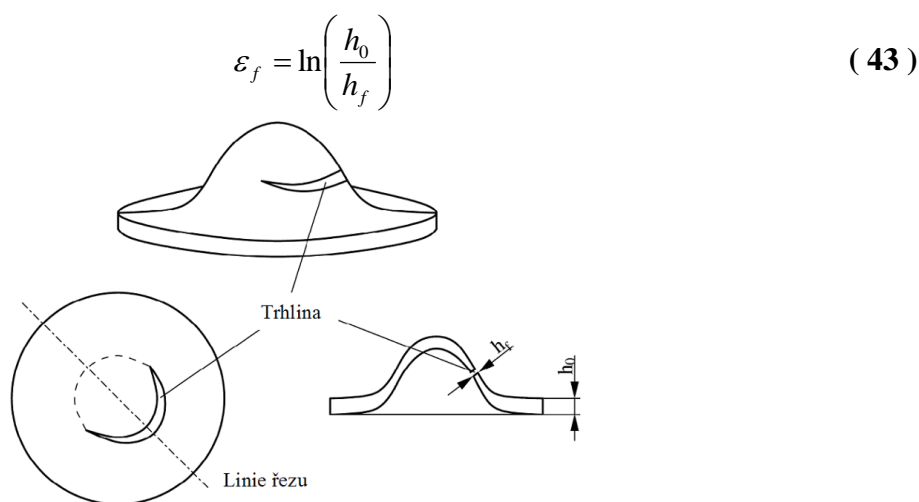
Lomová energie je definována vztahem (41) jako plocha pod křivkou síla – posunutí až do bodu začátku vzniku trhliny u_f , který je definován jako posunutí, kde síla při SPT poklesne o 20% vůči maximální síle, viz rovnice (42).

$$E^{SP} = \int_0^{u_f} F(u) du \quad (41)$$

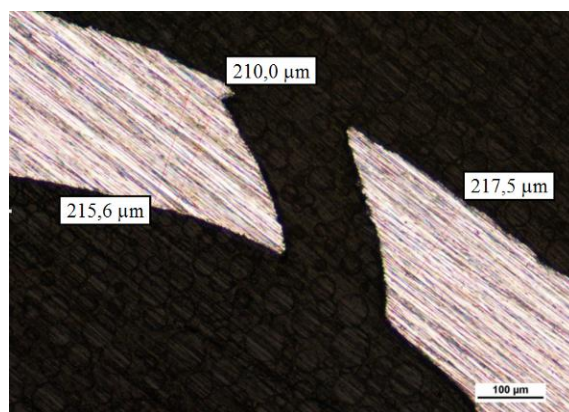
$$F_f = 0,8 * F_m \quad (42)$$

5.2.4.3 Vyhodnocení efektivní lomové deformace

Efektivní lomová deformace ε_f (effective fracture strain) je dle CWA 15627 [10] definována vztahem (43). Detaily měření h_f jsou patrné z Obr. 42. Nejdříve je nutné identifikovat iniciaci trhliny a v tomto místě vést řez procházející osou zkušebního disku. V praxi to lze udělat tak, že zkušební disk zalijeme do akrylátové hmoty a od kraje disku odbrousíme pomocí metalografické brusky 4 mm. Pomocí optického mikroskopu lze pak tloušťku h_f snadno změřit (viz Obr. 43).



Obr. 42 Schéma postupu měření nejmenší tloušťky po zkoušce SPT [10]

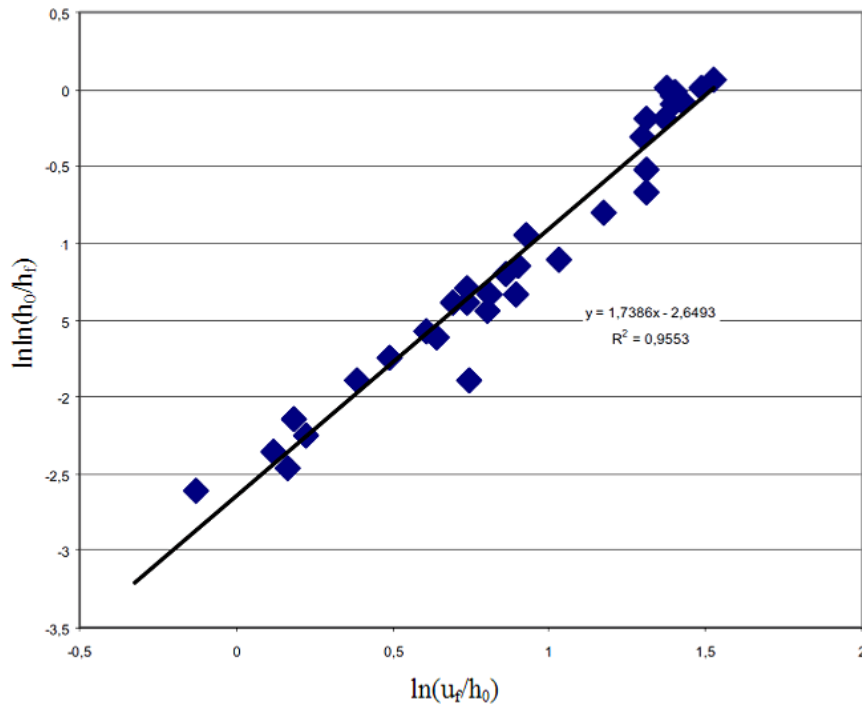


Obr. 43 Vzorek z materiálu 16 363 porušený při pokojové teplotě

Alternativním způsobem určení efektivní lomové deformace je její vyhodnocení přímo z grafu. Tuto závislost určuje vztah (44). Hodnoty empiricky určených konstant β_{SP} a x_{SP} jsou v některých člancích vyčísleny hodnotami $\beta_{SP}=0,5$, $x_{SP}=0,15$ [52][53][54].

$$\varepsilon_f = \beta_{SP} * \left(\frac{u_f}{h_0} \right)^{x_{SP}} \quad (44)$$

Jak lze usuzovat z Obr. 44, na kterém je ukázána regresní závislost mezi $\ln(\ln(h_0/h_f))$ a $\ln(u_f/h_0)$ měřeními v teplotním intervalu od -193°C do pokojové teploty, je shoda měření pro oba způsoby velmi dobrá. Evidentní výhoda metody používající vyhodnocení ze záznamu je její menší pracnost a možnost automatického vyhodnocení zkoušky.



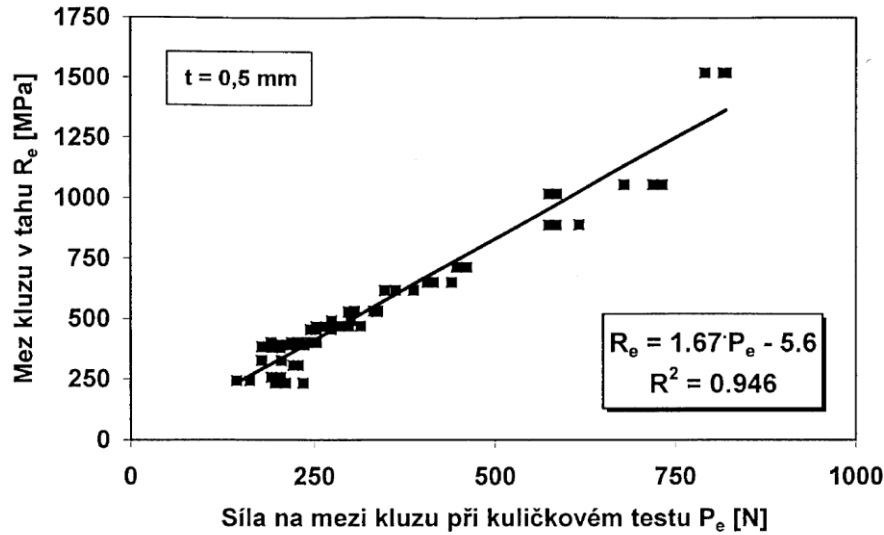
Obr. 44 Vztah mezi $\ln(\ln(h_0/h_f))$ a $\ln(u_f/h_0)$ pro rotorovou CrMoV ocel [55]

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

Získané hodnoty ze SPT, F_m a F_e , lze empiricky korelovat na mez pevnosti R_m a mez kluzu $R_e/R_{p0,2}$. Získané závislosti stanovené pro konkrétní zkušební zařízení představují pro stejné tloušťky disků lineární závislost mezi hodnotami SPT a standardních testů a v mnoha pracích se předpokládá, že jsou nezávislé na typu a struktuře, resp. pevnostním stavu testované oceli nebo slitiny [56][57]. Často se v literatuře vyskytují vztahy, které pokládají mezi F_m vs. R_m a F_e vs. $R_e/R_{p0,2}$ lineární závislost. Příklady těchto vztahů jsou uvedeny v rovnicích (45) a (46). Na Obr. 45 je grafické znázornění této závislosti.

$$R_e [MPa] = 5,98.F_e [N] \quad (45)$$

$$R_m [MPa] = 0,184.F_m [N] \quad (46)$$



Obr. 45 Korelace mezi mezí kluzu a zatížením F_e u SPT [55]

Možnou modifikací těchto metod je korelace meze pevnosti R_m a meze kluzu R_e s normalizovanými hodnotami, tedy porovnání R_e s F_e/h_0 a R_m s F_m/h_0^2 nebo $F_m/(u_m \cdot h_0)$. Rovnice (47) - (50) představují příklady obdržných korelací pro různé oceli.

$$R_e [MPa] = 0,36 \left(\frac{F_e}{h_0^2} \right) \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad [60] \quad (47)$$

$$R_e [MPa] = 413 \left(\frac{F_e}{h_0^2} \right) \left[\frac{kN}{mm^2} \right] + 149 \quad [61] \quad (48)$$

$$R_m [MPa] = 77 \left(\frac{F_m}{h_0^2} \right) \left[\frac{kN}{mm^2} \right] + 218 \quad [61] \quad (49)$$

$$R_m [MPa] = 0,496 \left(\frac{F_m}{h_0 \cdot u_m} \right) \left[\frac{kN}{mm^2} \right] - 94 \quad [3] \quad (50)$$

Pokusy provedené ve firmě COMTES FHT a.s. ukazují, že typová korelace (50), zahrnující také deformaci při maximální síle u_m , nejlépe koreluje výsledky ze SPT pro široké rozmezí materiálů a pevnostních hodnot. Na **Obr. 46** je grafické znázornění tohoto typu korelace, tj. závislosti meze pevnosti na normalizované maximální síle při SPT.

MPa

Obr. 46 Korelace meze pevnosti na normalizované maximální síle při SPT [62]

5.2.6. Určení přechodové teploty na základě výsledků SPT

Přechodovou teplotu mezi křehkým a houževnatým lomem můžeme u ocelí získat z výsledků teplotní závislosti SP energie. V řadě prací [43][50][63][64][65] je tato teplota korelována na přechodovou teplotu $FATT_{50}$.

SP energie je definována v kapitole 5.2.4.2 a je to energie potřebná pro porušení zkušebních disků. Při určité teplotě vykazují hodnoty energie E^{SP} a síly F_m náhlý pokles. Předpokládá se, že tato teplota koresponduje s bodem, kde se vyskytuje tranzitní chování. Přechodová teplota z SPT je definována rovnicí (51), tedy jako teplota odpovídající průměru maximální a minimální lomové energie při SPT.

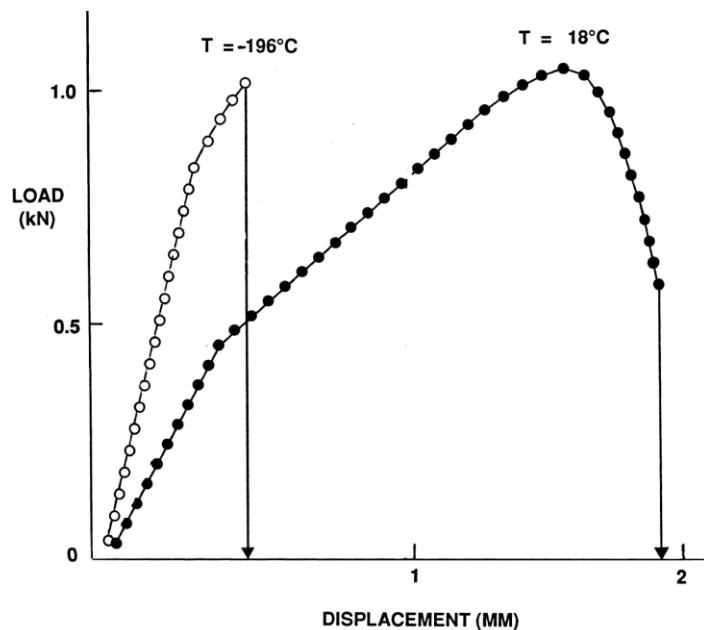
$$T_{SP} \approx \frac{E_{\max}^{SP} + E_{\min}^{SP}}{2} \quad (51)$$

Minimální energie se může určit jako minimální energie naměřená během testování, energie získaná extrapolací křivky pro teplotu 50K[50], nebo jako energie o velikosti 200J [43] [65].

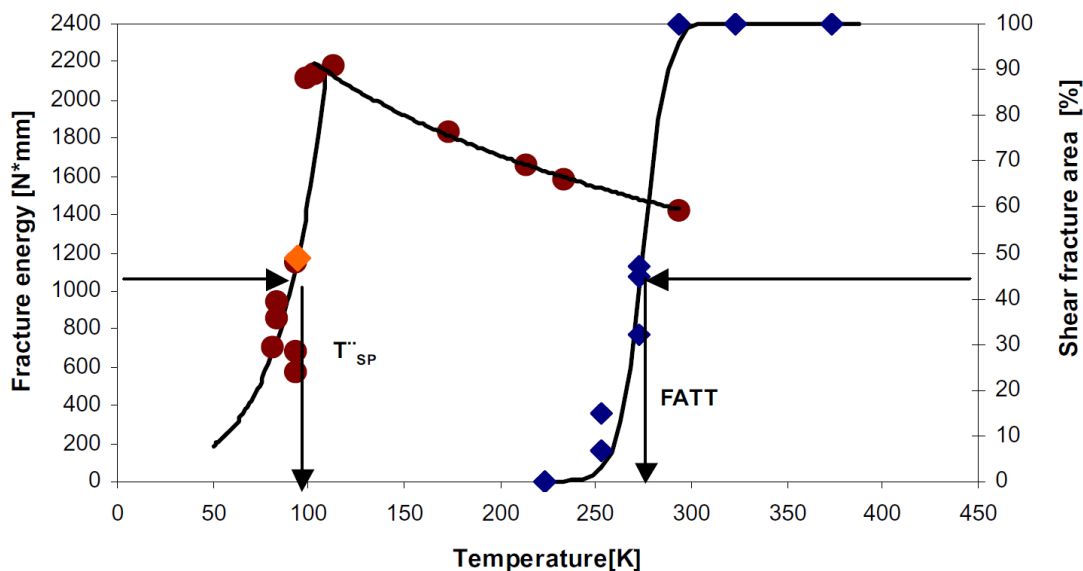
Tranzitní teplota T_{SP} získaná ze SPT může být korelována s teplotou DBDT (Ductile Brittle Transition Temperature) získanou měřením lomových ploch ($FATT_{50}$) dle vztahu (52), kde α_{SPT} je experimentálně získaný korelační koeficient, jehož hodnota je udávána obvykle v rozmezí 0,35-0,45. Koeficient α_{SPT} je ale materiálově závislý koeficient a např. v práci [66] byla jeho hodnota pro ocel X20CrMoV 11-1 stanovena na 0,539.

$$T_{SP} = \alpha_{SPT} * DBTT_{Charpy} \quad (52)$$

Příklad odlišného chování ocele při SPT v závislosti na teplotě je znázorněno na **Obr. 47**. Příklad možného posunu tranzitní teploty pro ocel vyhodnocené ze SPT a ze standardních Charpy těles užitím metody $FATT_{50}$ je znázorněn na **Obr. 48**.



Obr. 47 Příklad chování materiálu při SPT za různých teplot [67]



Obr. 48 Posun tranzitní teploty pro ocel vyhodnocené ze SPT a ze standardních Charpy těles 10x10x55 mm užitím metody $FATT_{50}$ [55]

5.2.7. Určení lomové houževnatosti na základě výsledků SPT

Určení lomové houževnatosti na základě výsledků SPT se dle CWA 15627 [10] má provádět zvlášť pro materiály vykazující tvárné a zvlášť pro materiály vykazující křehké porušení. Nicméně je problematické rozhodnout jen na základě výsledků SPT, zda se daný materiál bude při zkouškách LH porušovat křehce či houževnatě. Za určité vodítko se považuje hodnota efektivní lomová deformace (viz kapitola 5.2.4.3). Pokud je $\epsilon_f > 0,25$, uvažuje se, že se materiál bude porušovat houževnatě, pokud je tomu naopak, předpokládá se, že se takový materiál bude při stejné teplotě porušovat křehce. Tato problematika bude pro zkoumané materiály diskutována na základě výsledků testů v experimentální části 6.6.3.

5.2.7.1 Určení lomové houževnatosti pro materiály s tvárným porušením

Pro vyhodnocení lomové houževnatosti ze SPT je obvykle použita efektivní lomová deformace ε_f , viz kap. 5.2.4.3. Za materiály porušující se tvárně se často označují materiály s hodnotou $\varepsilon_f > 0,25$.

Empirický vztah mezi efektivní lomovou deformací a lomovou houževnatostí J_{IC} udává rovnice (53), kde k a J_0 jsou empiricky určené konstanty. Mao a Takahashi předpokládali, že k_{SP} a J_0 jsou invariantní, materiálově nezávislé konstanty; $k_{SP}=280$, $J_0=50$ [48] Nicméně, jiné práce (např. [52][53][68][69]) uvádí tyto konstanty s jinými hodnotami, a to někdy i podstatně odlišnými.

$$J_{IC} = k_{SP} \cdot \varepsilon_f - J_0 \quad (53)$$

5.2.7.2 Určení lomové houževnatosti pro materiály s křehkým porušením

Pro materiály vykazující křehké porušení při zkouškách lomové houževnatosti je navrženo vyhodnocení dle rovnice (54), kde K_{IC} je součinitel intenzity napětí pro rovinnou deformaci a C_{SP} je empiricky určená konstanta. σ_f^{SP} je vypočítána dle vztahu (55), ve kterém je F_m maximální síla při SPT v kN a h_0 je počáteční tloušťka zkušebního disku (0,5mm) [10] [48] [53]. Za materiály porušující se křehce se často označují materiály s hodnotou $\varepsilon_f < 0,25$.

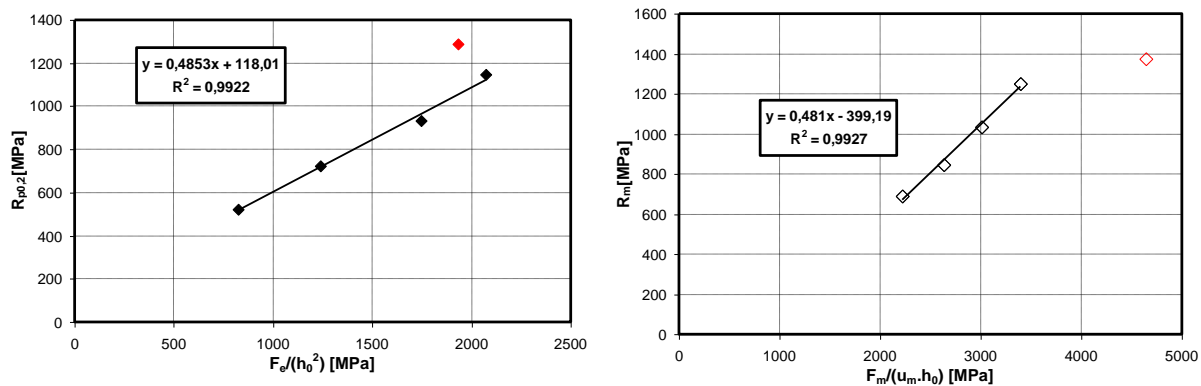
$$K_{IC} = C_{SP} * \left[\sigma_f^{SP} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (54)$$

$$\sigma_f^{SP} = 130 \left(\frac{F_m}{h_0^2} \right) - 320 \quad (55)$$

5.3. Mikro-tahové testy (M-TT)

Mezi hlavní výhody SPT patří možnost měření deformačně-napjatostních charakteristik na velmi malém množství materiálu. Toho je využíváno např. v energetice pro odhad zbytkové životnosti aktivních zařízení, pro hodnocení lokálních vlastností svarů nebo při zkouškách vzorků po termofyzikální simulaci. Často je SPT využíváno i v případě, že se požaduje vyhodnocení jen tahových vlastností. V mnoha případech lze celkem spolehlivě na základě korelačních vztahů přepočítat hodnoty SPT na mez pevnosti a, s o něco větší nejistotou, i na mez kluzu. Korelace na tažnost a kontrakci se obvykle nedělají.

V práci [70] autor uveřejnil korelace mezi SPT a tahovými vlastnostmi pro nízkouhlíkovou ocel a ocel 16343, viz Obr. 49. Navrhovaná korelace dobře fungovala pro 4 mikrostrukturní stavy z pěti, ale pátý stav materiálu, vykazující nejvyšší pevnost a zároveň nejnižší tažnost, se při SPT porušil předčasně křehce a to při nižší síle, než by vyplývalo z korelačního vztahu. Nutnost verifikace nalezených korelačních vztahů pro každý nový materiál patří mezi hlavní slabiny SPT.



Obr. 49 Závislost meze kluzu na normalizované síle F_e (vlevo) a závislost meze pevnosti na normalizované maximální síle ze SPT (vpravo) dle práce [70]

Řešením těchto problémů a snížení nejistoty při použití korelací by mohlo být použití takového zkušební tělesa, které zachovává výhody zkušebního disku SPT, ale zároveň je zatěžováno co nejvíce shodným druhem zatížení jako standardní zkouška tahem. Pro určení tahových vlastností pak z této úvahy vyplývá, že vzorek by měl být zatížen pouze v tahovém (jednoosém) módu zatížení. V experimentální části v kapitole 6.7 bude popsán proces návržení a zkoušení tohoto zkušební tělesa a budou diskutovány oblasti využitelnosti a spolehlivosti této metody mechanického zkoušení materiálu označené jako Mikro-tahové testy (M-TT).

6. Experimentální část

Experimentální část navazuje na část teoretickou, ze které bude čerpat a odkazovat na uvedené vztahy. V experimentální části jsou popsány jednotlivé testy, na základě kterých je možno diskutovat použitelnost miniaturních těles a budou diskutována také některá úskalí experimentálních měření standardních těles.

6.1. Experimentální materiál

Pro dosažení cílů disertační práce bylo testováno celkem 7 materiálů, z nichž některé byly podrobeny tepelnému zpracování, jehož výsledkem byly výrazně jiné mechanické vlastnosti oproti dodanému základnímu materiálu. Celkem tak vzniklo 19 různých materiálových stavů s různými mikrostrukturami a tím také výrazně odlišnými mechanickými vlastnostmi, kdy se mez pevnosti pohybovala od cca 640 MPa do 1970 MPa a i z hlediska křehkolomového chování vykazovaly materiály jak křehké, tak houževnaté porušení.

V **Tab. 2** jsou u všech sledovaných materiálů ve zkratce uvedeny druhy zkoušek, které na nich byly provedeny. Kvůli velké časové i finanční náročnosti jednotlivých zkoušek nebylo možno pro každý materiál provést všechny druhy zkoušek, ačkoli by to byl pro vzájemné porovnání ideální stav.

Tab. 2 Přehled provedených zkoušek

Materiál	Chemie	SPT	Tah	LH	Charpy	mini-Charpy	FATT/SPT	M-TT
m1	x	x	x	-----	-----	-----	-----	-----
m2	x	x	x	-----	-----	-----	-----	-----
m3	x	x	x	-----	-----	-----	-----	-----
m4	x	x	x	-----	-----	-----	-----	-----
m5	x	x	x	-----	-----	-----	-----	-----
m6	x	x	x	-----	x	x	-----	-----
m7	x	x	x	-----	-----	-----	-----	-----
m8	x	x	x	-----	x	x	x	x
m9	x	x	x	-----	-----	-----	-----	-----
m10	x	x	x	-----	-----	-----	-----	-----
m11	x	x	x	x	x	x	-----	-----
m12	x	x	x	x	-----	-----	-----	-----
m13	x	x	x	-----	-----	-----	-----	-----
m14	x	x	x	x	-----	-----	-----	x
m15	x	x	x	x	x	x	x	x
m16	x	x	x	-----	-----	-----	-----	x
m17	x	x	x	x	-----	-----	-----	x
m18	x	x	x	x	-----	-----	-----	x
m19	x	x	x	x	-----	-----	-----	x

V následujícím textu budou popsány jednotlivé materiálové stavy s jejich chemickým složením. Protože některé materiály byly použity v rámci komerčních zakázek, nebylo možno u některých z nich uvést podrobnější údaje.

Každému zkoumanému materiálu byl přidělen kód *mx*, kde *x* je číslo označující stejný stav materiálu s identickými mechanickými vlastnosti a mikrostrukturou. Toto označení je konzistentní pro celou experimentální část této práce.

6.1.1. Materiál s mikrostrukturou m1 a m2

Materiál, ze kterého tepelným zpracováním vznikly mikrostruktury m1 a m2, byl dodán jako tvářený polotovár s tloušťkou stěny 9,9 mm. Jednalo se o experimentální ocel, označenou jako *steel 1*, jejíž chemické složení je uvedeno v **Tab. 3**

Tab. 3 Chemické složení materiálu steel 1

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Sn	Al	V	Nb	Ti	N
0,27	0,2	0,87	0,01	0,003	0,94	0,58	0,12	0,1	0,007	0,031	0,009	0,028	0,037	0,01

Na dodaném polotovaru bylo provedeno následující zpracování:

- m1: austenitizace při 910°C/15min – kalení do oleje – popuštění na 300°C/2hod
- m2: austenitizace při 910°C/15min – kalení do oleje – popuštění na 650°C/2hod

6.1.2. Materiál s mikrostrukturou m3, m4 a m5

Materiál, ze kterého tepelným zpracováním vznikly mikrostruktury m3 – m5, byl dodán jako tvářený polotovár s tloušťkou stěny 9,5 mm. Opět se jednalo se o experimentální ocel, označenou jako *steel 2*, jejíž chemické složení je uvedeno v **Tab. 4**.

Tab. 4 Chemické složení materiálu steel 2

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Sn	Al	V	Nb	Ti	N
0,17	0,31	1,42	0,011	0,002	0,18	0,06	0,07	0,1	0,008	0,02	0,004	0,019	0,032	0,007

Na dodaném polotovaru bylo provedeno následující zpracování:

- m3: austenitizace při 910°C/15min – kalení do oleje – popuštění na 300°C/2hod
- m4: austenitizace při 910°C/15min – kalení do oleje – popuštění na 450°C/2hod
- m5: austenitizace při 910°C/15min – kalení do oleje – popuštění na 650°C/2hod

6.1.3. Materiál s mikrostrukturou m6

Jedná se o experimentální ocel, označenou jako *steel 3*, dodanou jako tvářený polotovár s tloušťkou stěny 12,7 mm. Chemické složení je uvedeno v **Tab. 5**.

Tab. 5 Chemické složení materiálu steel 3

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Sn	Al
0,305	0,275	0,75	0,008	0,002	1,025	0,2	0,15	0,1	0,01	0,035

Materiál by zkoušen v dodaném stavu. Předchozí tepelné zpracování nebylo známo.

6.1.4. Materiál s mikrostrukturou m7

Jedná se o modifikovanou niklovou superslitinu typové řady *MoNiCr* dodanou jako litý polotovár ve formě válce o \varnothing 20mm. Chemické složení je uvedeno v **Tab. 6**.

Tab. 6 Chemické složení materiálu MoNiCr

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Fe	Ni
0,02	0,03	0,09	0,01	0,03	6,01	19,00	3,00	zbytek

Materiál by zkoušen v dodaném stavu. Předchozí tepelné zpracování nebylo známo.

6.1.5. Materiál s mikrostrukturou m8 – m13

Materiál, ze kterého tepelným zpracováním vznikly mikrostruktury m8 – m13, byl dodán jako tvářený polotovár s tloušťkou stěny 10,9 mm. Opět se jednalo se o experimentální ocel, označenou jako *steel 4*, jejíž chemické složení je uvedeno v **Tab. 7**.

Tab. 7 Chemické složení materiálu steel 4

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Sn	Al	V	Nb	Ti	N
0,180	0,280	1,400	0,004	0,001	0,200	0,027	0,067	0,067	0,007	0,020	0,007	0,013	0,027	0,003

Na dodaném materiálu bylo provedeno následující zpracování:

- m8: dodaný stav bez tepelného zpracování (BM)
- m9: austenitizace při 880°C/15min – kalení do vody – popuštění na 250°C/1,5 hod
- m10: austenitizace při 880°C/15min – kalení do vody – popuštění na 350°C/1,5 hod
- m11: austenitizace při 880°C/15min – kalení do vody – popuštění na 440°C/1,5 hod
- m12: austenitizace při 880°C/15min – kalení do vody – popuštění na 500°C/1,5 hod
- m13: austenitizace při 880°C/15min – kalení do vody – popuštění na 620°C/1,5 hod

6.1.6. Materiál s mikrostrukturou m14 – m18

Materiály s mikrostrukturou m14 – m18 vznikly různým tepelným zpracováním středně legované oceli *34CrNiMo6* (dle značení ČSN16 343), která se používá pro vysoce zatěžované součásti v automobilech a motorech, jako jsou klikové hřídele, součásti řízení, převodové části a hnací hřídele. Materiál byl dodán jako tvářený polotovár o tloušťce stěny 30 mm. Chemické složení je uvedeno v **Tab. 8**.

Tab. 8 Chemické složení materiálu 34 CrNiMo6

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
0,34	0,20	0,65	0,01	0,02	1,50	0,23	1,50

Na dodaném materiálu bylo provedeno následující zpracování:

- m14: austenitizace při 860°C/15min – kalení do vody – popuštění na 250°C/2 hod
- m15: dodaný stav bez tepelného zpracování (BM)
- m16: austenitizace při 880°C/15min – kalení do oleje – popuštění na 680°C/2 hod
- m17: austenitizace při 880°C/15min – kalení do oleje – popuštění na 750°C/2 hod
- m18: austenitizace při 880°C/15min – kalení do oleje – popuštění na 450°C/2 hod

6.1.7. Materiál s mikrostrukturou m19

Materiálem označeným jako m19 je chromová žárovečná ocel *P91* (X10CrMoVNb9-1) mikrolegovaná vanadem a niobem a dále kontrolovaným obsahem dusíku. Tato ocel je určena pro výrobu výkovků, odlitků, plechů a trubek, jejichž aplikace se uvažuje při teplotách 550 – 650°C, tedy zejména pro energetiku. Materiál byl dodán ve formě tvářeného polotovaru pro experimentální účely. Jako jediný materiál byl zkoušen na pracovišti Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) v Drážďanech. Chemické složení je uvedeno v **Tab. 9**.

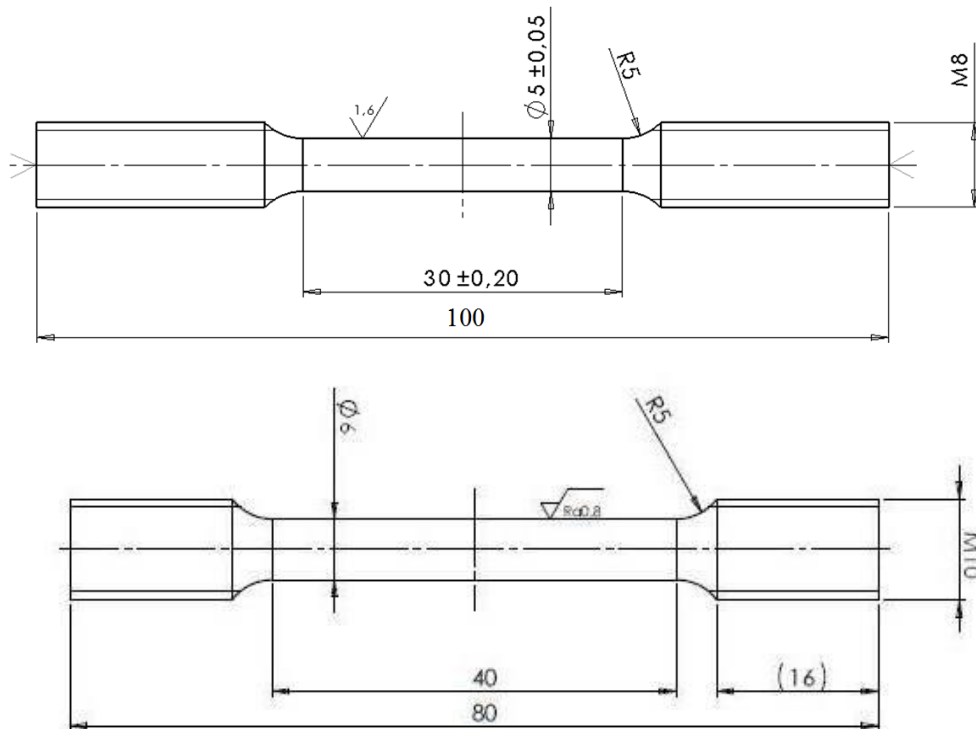
Tab. 9 Chemické složení materiálu P91

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	V	Nb
0,116	0,464	0,507	0,0085	<0,0006	9,5	0,91	0,235	0,0195	>0,230	0,0903

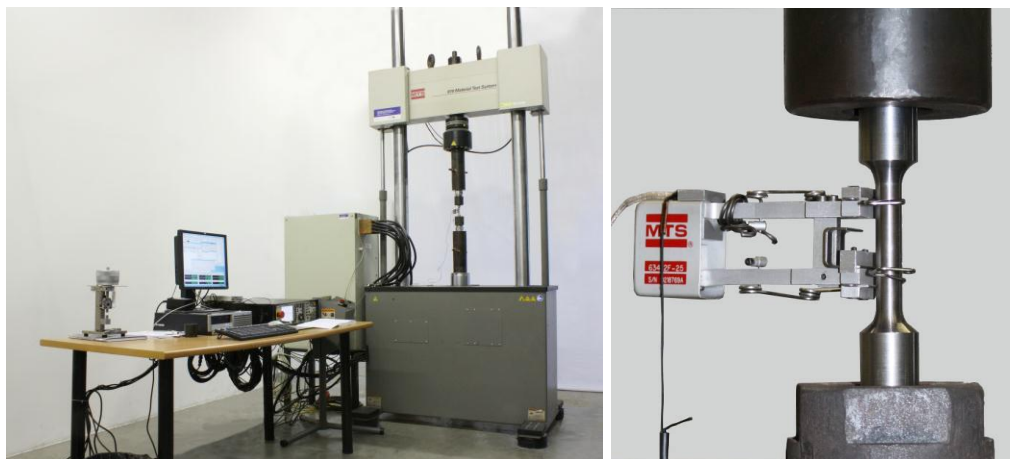
6.2. Zkouška tahem

Zkoušky tahem materiálů v základním stavu i po tepelném zpracování byly provedeny dle normy ČSN EN ISO 6892-1: *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty* [14]. Zkoušky byly provedeny na servohydraulickém zkušebním zařízení Inova a MTS 810. Použitý snímač deformace byl extenzometr MTS 634.12F-25. Měření bylo provedeno na 3 vzorcích pro každý typ tepelně zpracovaného materiálu, výjimečně bylo použito zkušebních těles méně. Zkušební tyče byly odebrány v podélném směru vzhledem ke směru válcování dodaných polotovarů. Geometrie typicky použitých zkušebních těles je znázorněna na **Obr. 50**. Uspořádání měřicí soustavy pro zkoušku tahem je vyobrazeno na **Obr. 51**. Před zkouškou a po zkoušce tahem byly změřeny charakteristické rozměry zkušebních těles pro stanovení napěťových a deformačních charakteristik ($R_{p0,2}$, R_m , A_g , A_5 , a Z). U některých materiálů byly naměřeny výrazné meze kluzu, ale rozdíly mezi R_{eH} a $R_{p0,2}$ byly v těchto případech zanedbatelné a pro další práci bylo výhodné počítat pouze s jednou hodnotou meze kluzu, tedy $R_{p0,2}$.

Vybrané reprezentativní záznamy zkoušek tahem pro všechny mikrostrukturní stavy m1 – m19 jsou uvedeny na **Obr. 52** a **Obr. 53**. Výsledky průměrných naměřených hodnot ze zkoušek tahem jsou shrnuty v **Tab. 10** a jejich grafické znázornění je vyobrazeno na **Obr. 54** a **Obr. 55**.



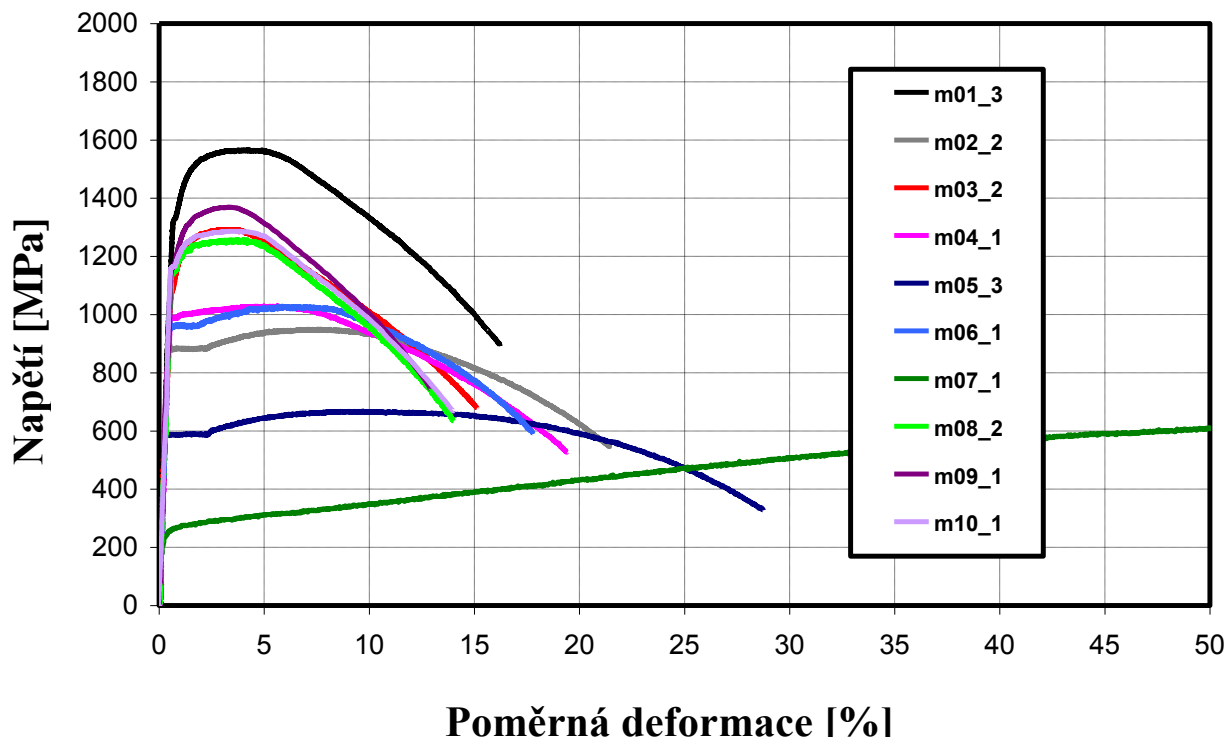
Obr. 50 Geometrie zkušebních tyčí pro zkoušku tahem



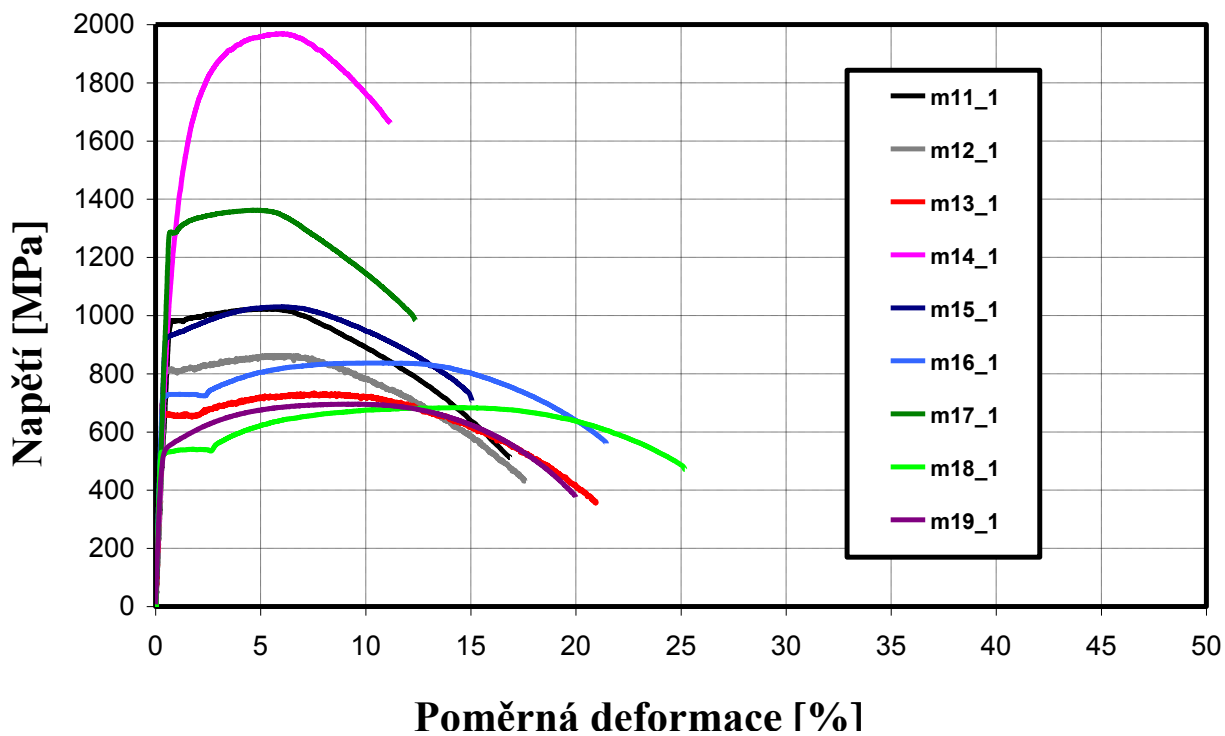
Obr. 51 Vlevo: Servohydraulický univerzální zkušební stroj MTS 810
 Vpravo: Uspořádání měřící soustavy pro zkoušku tahem

Tab. 10. Výsledky zkoušky tahem

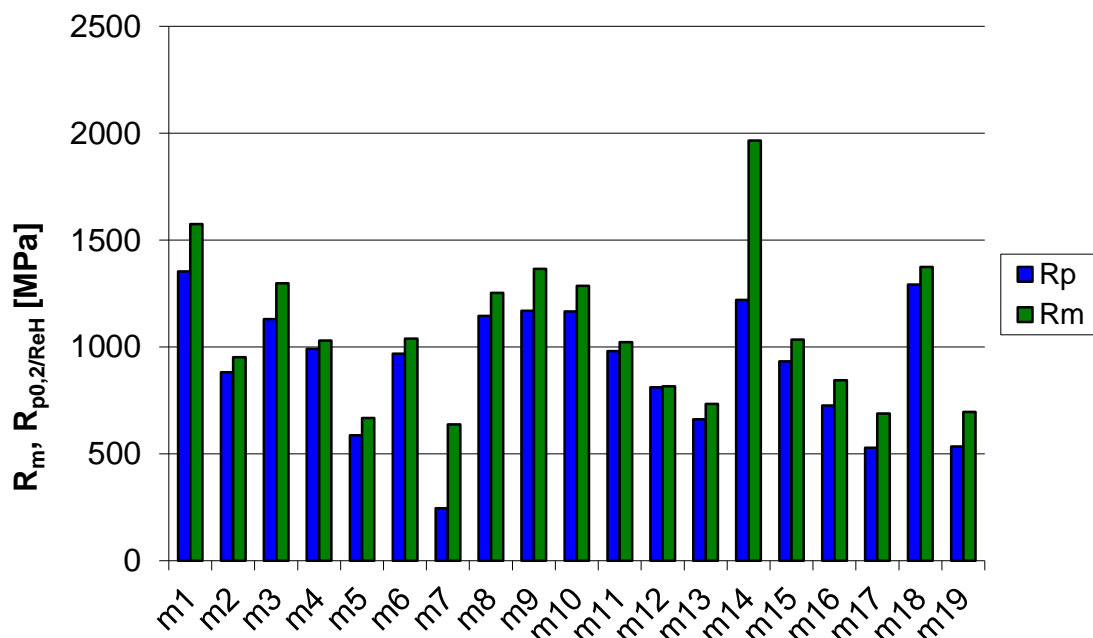
Materiál	R_{p0,2} [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A₅ [%]	Z [%]
m1	1353,8	1574,8	3,3	13,9	62,4
m2	881,3	952,4	7,5	19,2	67,9
m3	1130,0	1298,4	2,9	13,8	68,8
m4	991,7	1029,8	4,5	17,0	72,3
m5	586,4	668,1	9,4	24,5	79,1
m6	969,1	1039,4	5,4	17,9	65,9
m7	246,3	638,3	64,8	60,6	66,2
m8	1145,5	1252,1	2,5	14,3	70,2
m9	1168,5	1365,6	2,7	13,6	67,1
m10	1166,6	1285,6	2,9	14,1	69,4
m11	981,1	1022,1	4,7	17,5	70,9
m12	812,0	816,0	6,2	17,5	71,2
m13	661,2	734,0	7,2	21,4	74,1
m14	1219,6	1965,0	4,4	10,7	38,8
m15	932,0	1034,2	5,4	15,6	55,8
m16	726,8	844,7	10,0	20,5	61,7
m17	528,4	688,3	13,7	24,8	63,1
m18	1291,9	1373,9	3,8	13,9	45,6
m19	534,7	696,2	9,3	20,0	74,3



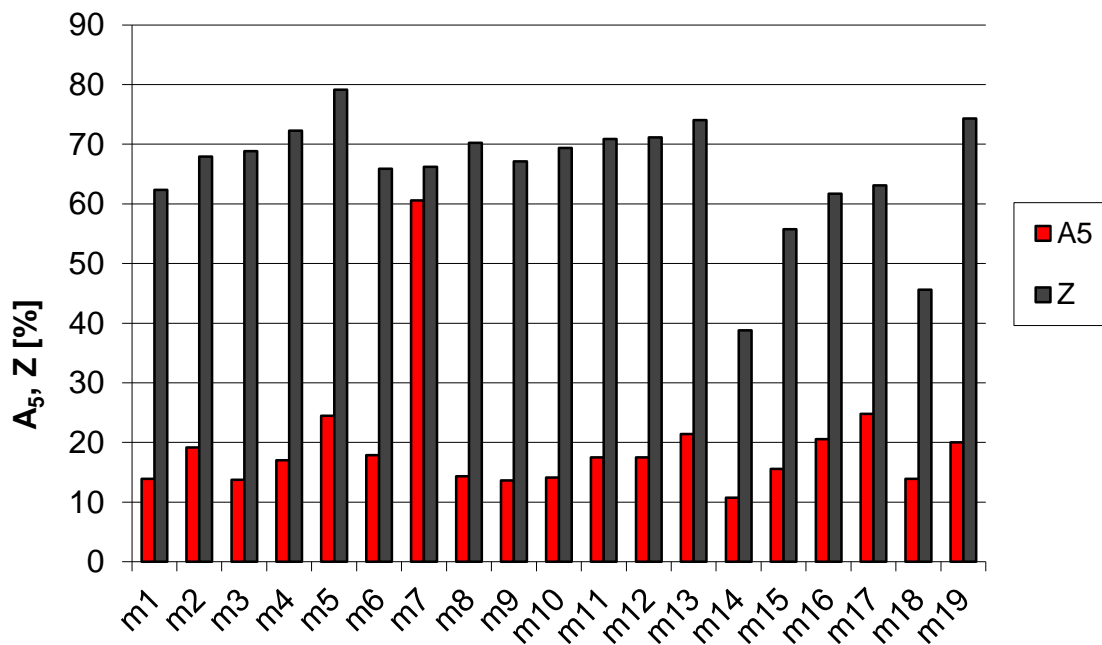
Obr. 52 Reprezentativní záznamy zkoušky tahem pro materiály m1 – m10



Obr. 53 Reprezentativní záznamy zkoušky tahem pro materiály m11 – m19



Obr. 54 Grafické znázornění meze kluzu a meze pevnosti pro sledované materiály



Obr. 55 Grafické znázornění tažnosti a kontrakce pro sledované materiály

6.3. Zkouška rázem v ohybu

V mnoha případech při nedostatku materiálu je třeba korelovat hodnoty nárazové práce získaných z podrozměrných Charpy těles na tělesa standardní velikosti 10x10x55 mm. Autorovi je známo, že obecný přepočítání vrubové houževnatosti měřené na vzorcích různých velikostí neexistuje [22], nicméně alespoň kvalifikovaný odhad v této problematice může být v mnoha případech velmi užitečný.

Cílem této kapitoly bylo na základě rozsáhlého experimentu odhadnout, v jakém trendu se mění hodnota **KV** se snižujícím se průřezem těles. Pro splnění tohoto cíle bylo měřeno téměř 120 Charpy těles s různým průřezem. Dále bylo cílem změřit teplotu **FATT₅₀**, a to jednak z důvodu určení standardní charakteristiky použitelné pro korelaci s SPT, jednak byla teplota **FATT₅₀** měřena i na mini-Charpy vzorcích a v následujících kapitolách bude diskutována vhodnost této metody. Pro účely stanovení **FATT₅₀** bylo testováno cca 60 zkušebních těles.

Ve všech případech se tělesa testovala za použití instrumentované metody.

6.3.1. Provedení zkoušek

Zkoušky rázem v ohybu byly provedeny na instrumentovaném Charpy kladivu WPM PSd s počáteční energií 300J dle ČSN EN ISO 14 556 - Zkouška rázem v ohybu na kyvadlovém kladivu tyčí Charpy s V-vrubem - Instrumentovaná zkušební metoda [21] a zároveň ve shodě s ČSN ISO 148-1 Kovové materiály - Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy - Část 1: Zkušební metoda [19]. Geometrie použitých zkušebních těles byla jednak standardní dle **Obr. 7** na str.19 a dále s redukovaným rozměrem výšky **H** a šířky **B**. Pro zkoušky na mini-Charpy tělesech (viz geometrie na **Obr. 8**) bylo použito instrumentované kladivo s počáteční energií 15 J.

Vzhledem ke vzrůstajícímu významu zkoušek podrozměrných těles (např. pro hodnocení zbytkové životnosti či při jiných aplikacích s nedostatečným množstvím experimentálního materiálu) bude také podrobně diskutován vliv rozměru zkušebních těles na naměřené hodnoty.



Obr. 56 Vlevo: Kladivo – 300J, vpravo: kladivo 15 J

6.3.2. Výsledky zkoušek při pokojové teplotě

Zkoušky rázem v ohybu při pokojové teplotě byly provedeny pro materiály m06, m08, m11 a m15. Výsledky zkoušek rázem v ohybu metodou Charpy dle ČSN ISO 148-1 včetně uvedení rozměrů zkušebního tělesa a jeho orientaci v materiálu jsou v **Tab. 11** - **Tab. 14**. Záznamy zkoušek z instrumentovaného kladiva jsou zobrazeny na **Obr. 57** - **Obr. 60**.

Tab. 11 Výsledky zkoušek rázem v ohybu dle Charpyho, materiál m06, 20°C

Vzorek	Vrub V	Rozměry		Hloubka vrubu mm	KV J	KCV J/cm ²	Orientace vzorku
		B mm	H mm				
m06_l_10x10_1	V	9,99	9,99	1,99	132,3	165,5	podélně (l-longitudinal)
m06_l_10x10_2	V	9,99	9,99	1,99	131,4	164,4	
m06_l_10x10_3	V	9,99	9,99	1,99	134,4	168,2	
Průměr		9,99	9,99	1,99	132,7	166,0	
m06_t_10x10_1	V	9,96	9,99	1,99	118,9	149,2	příčně (t-transversal)
m06_t_10x10_2	V	9,96	9,99	1,99	118,9	149,2	
m06_t_10x10_3	V	9,96	9,99	1,99	113,9	142,9	
Průměr		9,96	9,99	1,99	117,2	147,1	
m06_l_7,5x7,5_1	V	7,50	7,50	1,97	48,8	117,7	podélně (l-longitudinal)
m06_l_7,5x7,5_2	V	7,50	7,50	1,97	52,2	125,9	
m06_l_7,5x7,5_3	V	7,50	7,50	1,97	49,4	119,1	
Průměr		7,50	7,50	1,97	50,1	120,9	
m06_t_7,5x7,5_1	V	7,50	7,50	1,97	42,9	103,4	příčně (t-transversal)
m06_t_7,5x7,5_2	V	7,50	7,50	1,97	45,1	108,7	
m06_t_7,5x7,5_3	V	7,50	7,50	1,97	43,6	105,1	
Průměr		7,50	7,50	1,97	43,9	105,8	
m06_l_5x5_1	V	4,99	5,02	0,99	21,2	105,4	podélně (l-longitudinal)
m06_l_5x5_2	V	4,99	5,02	0,99	21,6	107,4	
m06_l_5x5_3	V	4,99	5,02	0,99	21,6	107,4	
Průměr		4,99	5,02	0,99	21,5	106,7	
m06_t_5x5_1	V	4,99	5,02	0,99	19,7	98,0	příčně (t-transversal)
m06_t_5x5_2	V	4,99	5,02	0,99	18,9	94,0	
m06_t_5x5_3	V	4,99	5,02	0,99	20,8	103,4	
Průměr		4,99	5,02	0,99	19,8	98,5	
m06_l_3x4_1	V	3,02	4,00	0,99	7,6	83,6	podélně (l-longitudinal)
m06_l_3x4_2	V	3,02	4,00	0,99	7,3	80,3	
m06_l_3x4_3	V	3,02	4,00	0,99	7,5	82,5	
m06_l_3x4_4	V	3,02	4,00	0,99	7,3	80,3	
m06_l_3x4_5	V	3,02	4,00	0,99	7,6	83,6	
m06_l_3x4_6	V	3,02	4,00	0,99	7,3	80,3	
Průměr		3,02	4,00	0,99	7,4	81,8	
m06_t_3x4_1	V	3,02	4,00	0,99	7,4	81,4	příčně (t-transversal)
m06_t_3x4_2	V	3,02	4,00	0,99	7,3	80,3	
m06_t_3x4_3	V	3,02	4,00	0,99	6,7	73,7	
m06_t_3x4_4	V	3,02	4,00	0,99	7,1	78,1	
m06_t_3x4_5	V	3,02	4,00	0,99	6,6	72,6	
m06_t_3x4_6	V	3,02	4,00	0,99	7,1	78,1	
Průměr		3,02	4,00	0,99	7,0	77,4	

Tab. 12 Výsledky zkoušek rázem v ohybu dle Charpyho, materiál m08, 20°C

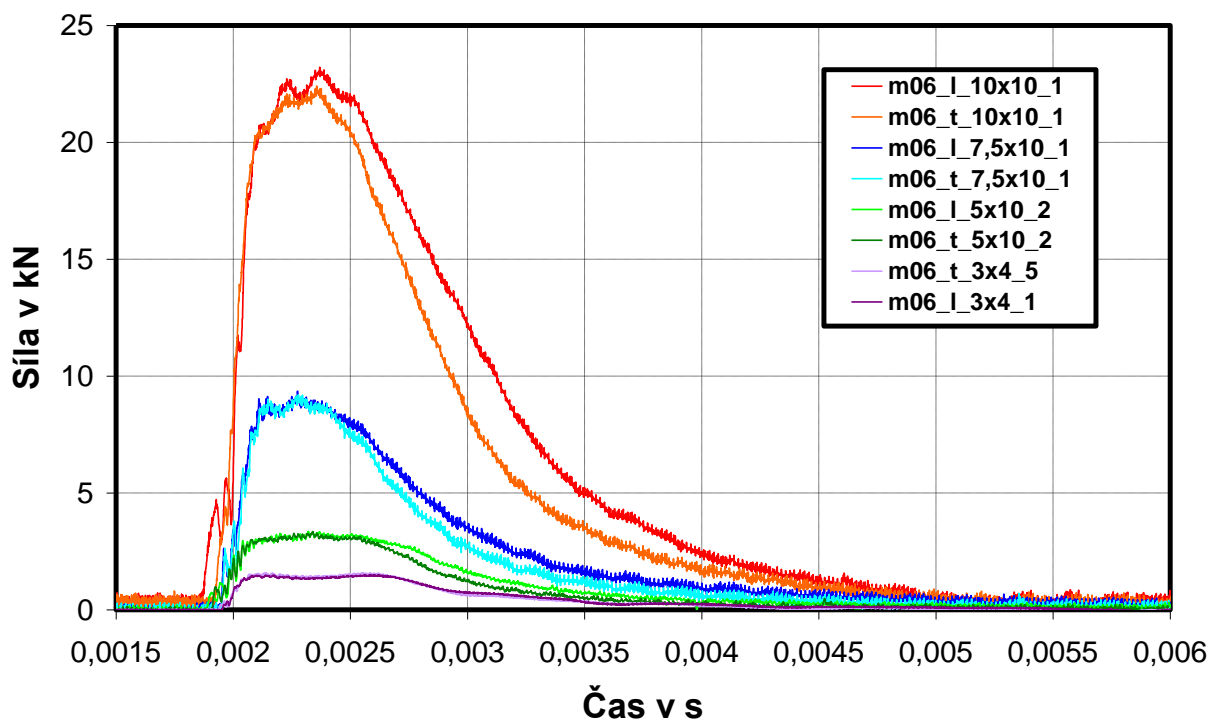
Vzorek	Vrub V	Rozměry		Hloubka vrubu mm	KV J	KCV J/cm ²	Orientace vzorku
		B mm	H mm				
m08_l_10x10_1	V	10,01	10,01	1,99	163,7	203,9	podélně (l-longitudinal)
m08_l_10x10_2	V	10,01	10,01	1,99	164,3	204,7	
m08_l_10x10_3	V	10,01	10,01	1,99	161,0	200,5	
Průměr	V	10,01	10,01	1,99	163,0	203,0	
m08_t_10x10_1	V	10,00	10,00	2,00	60,9	76,1	příčně (t-transversal)
m08_t_10x10_2	V	10,00	10,00	2,00	63,6	79,5	
m08_t_10x10_3	V	10,00	10,00	2,00	62,5	78,1	
Průměr	V	10,00	10,00	2,00	62,3	77,9	
m08_l_7,5x10_1	V	7,51	10,01	1,97	81,3	134,6	podélně (l-longitudinal)
m08_l_7,5x10_2	V	7,51	10,01	1,97	76,7	127,0	
m08_l_7,5x10_3	V	7,51	10,01	1,97	87,6	145,1	
Průměr	V	7,51	10,01	1,97	81,9	135,6	
m08_t_7,5x10_1	V	7,49	10,00	1,99	47,1	78,5	příčně (t-transversal)
m08_t_7,5x10_2	V	7,49	10,00	1,99	41,2	68,7	
m08_t_7,5x10_3	V	7,49	10,00	1,99	46,0	76,7	
Průměr	V	7,49	10,00	1,99	44,8	74,6	
m08_l_5x10_1	V	5,01	10,00	1,97	63,8	158,6	podélně (l-longitudinal)
m08_l_5x10_2	V	5,01	10,00	1,97	62,3	154,9	
m08_l_5x10_3	V	5,01	10,00	1,97	63,5	157,8	
Průměr	V	5,01	10,00	1,97	63,2	157,1	
m08_t_5x10_1	V	5,01	10,01	1,97	40,3	100,0	příčně (t-transversal)
m08_t_5x10_2	V	5,01	10,01	1,97	41,7	103,5	
m08_t_5x10_3	V	5,01	10,01	1,97	41,7	103,5	
Průměr	V	5,01	10,01	1,97	41,2	102,4	
m08_l_2,5x10_1	V	2,50	10,00	1,97	24,2	120,5	podélně (l-longitudinal)
m08_l_2,5x10_2	V	2,50	10,00	1,97	24,4	121,5	
m08_l_2,5x10_3	V	2,50	10,00	1,97	24,7	123,0	
Průměr	V	2,50	10,00	1,97	24,4	121,7	
m08_t_2,5x10_1	V	2,50	10,01	1,97	17,9	89,1	příčně (t-transversal)
m08_t_2,5x10_2	V	2,50	10,01	1,97	19,6	97,5	
m08_t_2,5x10_3	V	2,50	10,01	1,97	19,0	94,5	
Průměr	V	2,50	10,01	1,97	18,8	93,7	
m08_l_3x4_1	V	3,00	4,00	1,00	8,6	95,6	podélně (l-longitudinal)
m08_l_3x4_2	V	3,00	4,00	1,00	8,6	95,6	
m08_l_3x4_3	V	3,00	4,00	1,00	8,9	98,9	
m08_l_3x4_4	V	3,00	4,00	1,00	8,8	97,8	
m08_l_3x4_5	V	3,00	4,00	1,00	9,3	103,3	
m08_l_3x4_6	V	3,00	4,00	1,00	9,3	103,3	
Průměr	V	3,00	4,00	1,00	8,9	99,1	
m08_t_3x4_1	V	3,00	4,00	1,00	8,1	90,0	příčně (t-transversal)
m08_t_3x4_2	V	3,00	4,00	1,00	8,1	90,0	
m08_t_3x4_3	V	3,00	4,00	1,00	8,0	88,9	
m08_t_3x4_4	V	3,00	4,00	1,00	8,7	96,7	
m08_t_3x4_5	V	3,00	4,00	1,00	8,4	93,3	
m08_t_3x4_6	V	3,00	4,00	1,00	7,9	87,8	
Průměr	V	3,00	4,00	1,00	8,2	91,1	

Tab. 13 Výsledky zkoušek rázem v ohybu dle Charpyho, materiál m11, 20°C

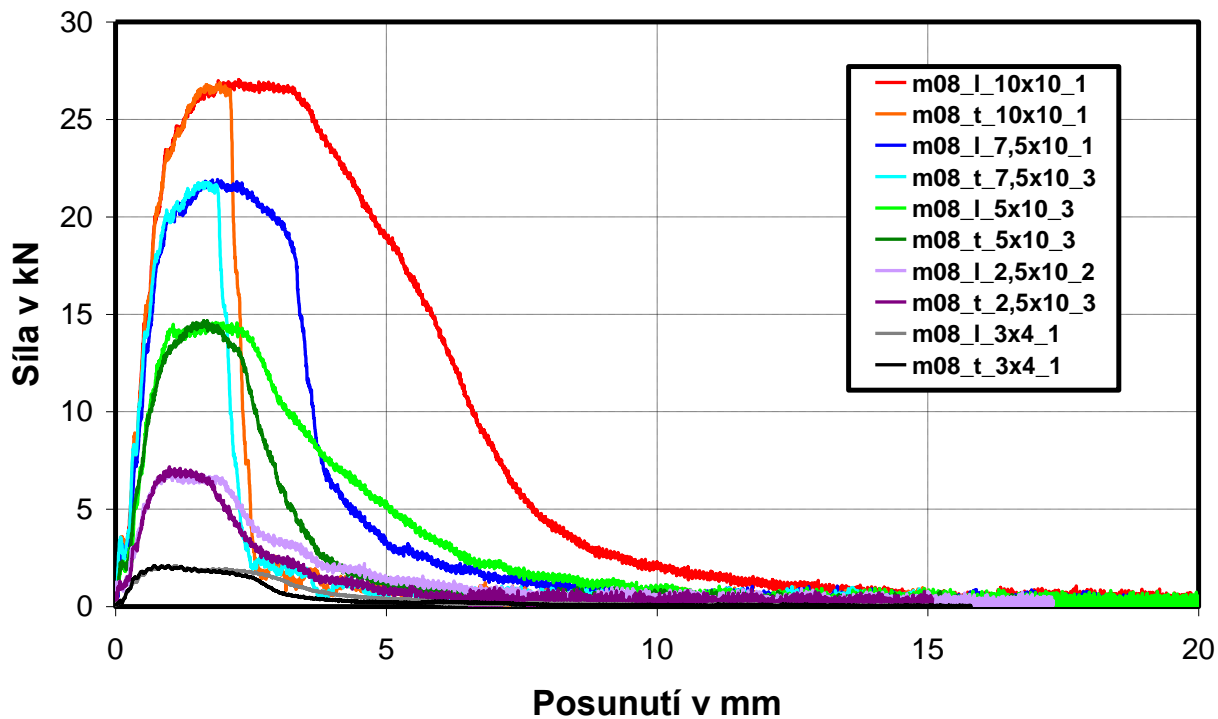
Vzorek	Vrub V	Rozměry		Hloubka vrubu mm	KV J	KCV J/cm ²	Orientace vzorku
		B mm	H mm				
m11_l_10x10_2	V	10,00	10,00	2,00	222,5	278,1	podélně (l-longitudinal)
m11_l_10x10_3	V	10,00	10,00	2,00	218,2	272,8	
m11_l_10x10_4	V	10,00	10,00	2,00	219,5	274,4	
m11_l_10x10_5	V	10,00	10,00	2,00	228,7	285,9	
Průměr		10,00	10,00	2,00	222,2	277,8	
m11_t_10x10_1	V	10,00	10,00	2,00	198,0	247,5	příčně (t-transversal)
m11_t_10x10_2	V	10,00	10,00	2,00	199,7	249,6	
m11_t_10x10_3	V	10,00	10,00	2,00	195,6	244,5	
Průměr		10,00	10,00	2,00	197,8	247,2	
m11_l_7,5x10_1	V	7,50	10,00	2,00	141,9	236,5	podélně (l-longitudinal)
m11_l_7,5x10_2	V	7,50	10,00	2,00	144,4	240,7	
m11_l_7,5x10_3	V	7,50	10,00	2,00	143,2	238,7	
Průměr		7,50	10,00	2,00	143,2	238,6	
m11_t_10x10_1	V	7,50	10,00	2,00	111,3	185,5	příčně (t-transversal)
m11_t_10x10_2	V	7,50	10,00	2,00	119,4	199,0	
m11_t_10x10_3	V	7,50	10,00	2,00	118,4	197,3	
Průměr		7,50	10,00	2,00	116,4	193,9	
m11_l_5x10_1	V	5,00	9,99	2,00	74,7	187,0	podélně (l-longitudinal)
m11_l_5x10_2	V	5,00	9,99	2,00	74,2	185,7	
m11_l_5x10_3	V	5,00	9,99	2,00	76,3	191,0	
Průměr		5,00	9,99	2,00	75,1	187,9	
m11_t_5x10_1	V	5,00	10,00	2,00	59,0	147,5	příčně (t-transversal)
m11_t_5x10_2	V	5,00	10,00	2,00	58,4	146,0	
m11_t_5x10_3	V	5,00	10,00	2,00	61,2	153,0	
Průměr		5,00	10,00	2,00	59,5	148,8	
m11_l_2,5x10_1	V	2,50	10,00	2,00	24,1	120,5	podélně (l-longitudinal)
m11_l_2,5x10_2	V	2,50	10,00	2,00	24,1	120,5	
m11_l_2,5x10_3	V	2,50	10,00	2,00	26,0	130,0	
Průměr		2,50	10,00	2,00	24,7	123,7	
m11_l_2,5x10_1	V	2,50	10,00	2,00	23,1	115,5	příčně (t-transversal)
m11_l_2,5x10_2	V	2,50	10,00	2,00	23,4	117,0	
m11_l_2,5x10_3	V	2,50	10,00	2,00	22,1	110,5	
Průměr		2,50	10,00	2,00	22,9	114,3	
m11_l_3x4_1	V	3,00	4,00	0,99	10,1	111,8	podélně (l-longitudinal)
m11_l_3x4_2	V	3,00	4,00	0,99	10,9	120,7	
m11_l_3x4_3	V	3,00	4,00	0,99	10,6	117,4	
m11_l_3x4_4	V	3,00	4,00	0,99	9,5	105,2	
m11_l_3x4_5	V	3,00	4,00	0,99	9,7	107,4	
m11_l_3x4_6	V	3,00	4,00	0,99	10,9	120,7	
Průměr		3,00	4,00	0,99	10,3	113,9	
m11_t_3x4_1	V	3,00	4,00	0,99	8,7	96,3	příčně (t-transversal)
m11_t_3x4_2	V	3,00	4,00	0,99	8,7	96,3	
m11_t_3x4_3	V	3,00	4,00	0,99	8,8	97,5	
m11_t_3x4_4	V	3,00	4,00	0,99	8,0	88,6	
m11_t_3x4_5	V	3,00	4,00	0,99	8,7	96,3	
m11_t_3x4_6	V	3,00	4,00	0,99	9,6	106,3	
Průměr		3,00	4,00	0,99	8,8	96,9	

Tab. 14 Výsledky zkoušek rázem v ohybu dle Charpyho, materiál m15, 20°C

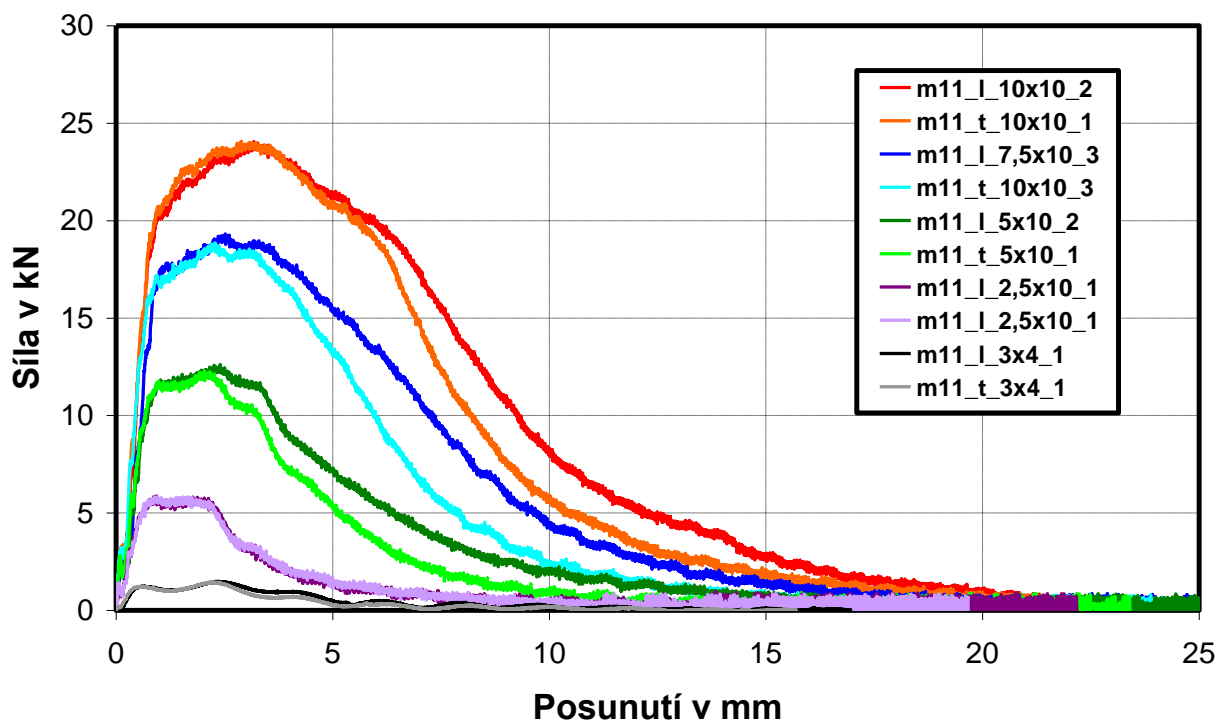
Vzorek	Vrub V	Rozměry		Hloubka vrubu mm	KV J	KCV J/cm ²	Orientace vzorku
		B mm	H mm				
m15_l_10x10_1	V	9,99	10,00	2,00	89,1	111,5	podélně (l-longitudinal)
m15_l_10x10_2	V	9,99	10,00	2,00	89,9	112,5	
m15_l_10x10_3	V	9,99	10,00	2,00	90,3	113,0	
m15_l_10x10_4	V	9,99	10,00	2,00	91,5	114,5	
m15_l_10x10_5	V	9,99	10,00	2,00	84,3	105,5	
m15_l_10x10_6	V	9,99	10,00	2,00	89,1	111,5	
m15_l_10x10_7	V	9,99	10,00	2,00	89,9	112,5	
m15_l_10x10_8	V	9,99	10,00	2,00	90,3	113,0	
Průměr		10,0	10,0	2,0	89,3	111,7	
m15_l_3x4_1	V	3,00	4,00	1,00	5,8	64,4	podélně (l-longitudinal)
m15_l_3x4_2	V	3,00	4,00	1,00	5,7	63,3	
m15_l_3x4_3	V	3,00	4,00	1,00	5,5	61,1	
m15_l_3x4_4	V	3,00	4,00	1,00	5,5	61,1	
m15_l_3x4_5	V	3,00	4,00	1,00	5,8	64,4	
m15_l_3x4_6	V	3,00	4,01	1,01	5,8	64,4	
m15_l_3x4_7	V	3,00	4,01	1,01	5,7	63,3	
m15_l_3x4_8	V	3,00	4,01	1,01	5,5	61,1	
Průměr		3,00	4,00	1,00	5,7	62,9	



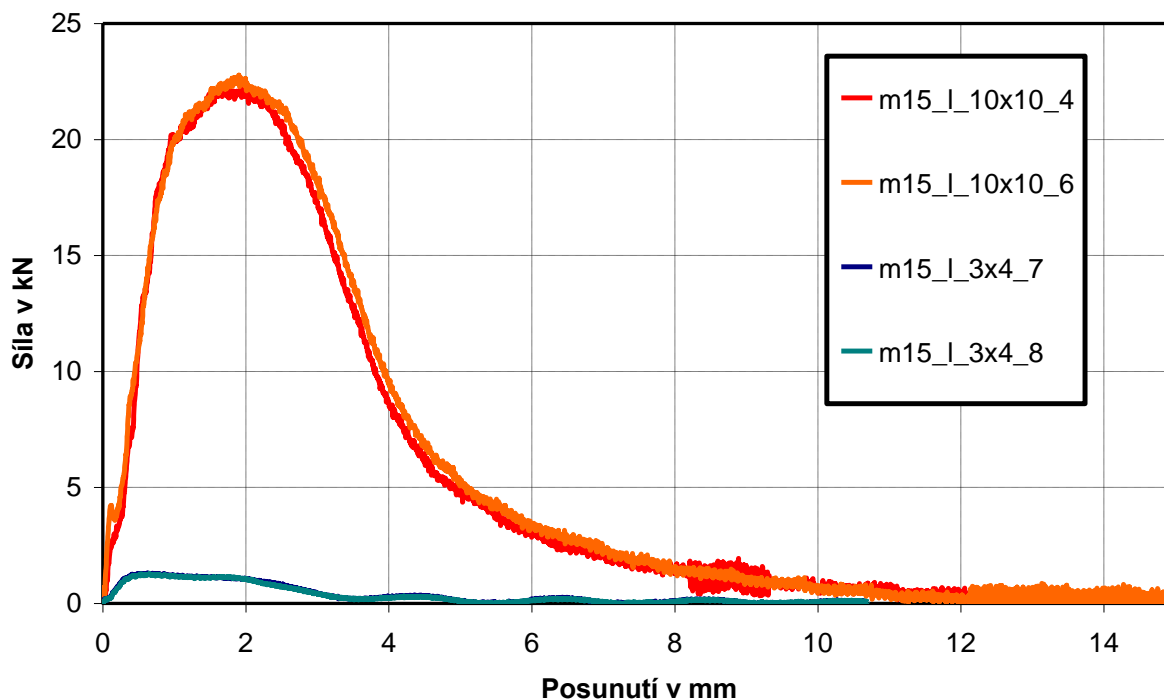
Obr. 57 Instrumentované záznamy za zkoušek rázem v ohybu, materiál m06, 20°C



Obr. 58 Instrumentované záznamy za zkoušek rázem v ohybu, materiál m08, 20°C



Obr. 59 Instrumentované záznamy za zkoušek rázem v ohybu, materiál m11, 20°C

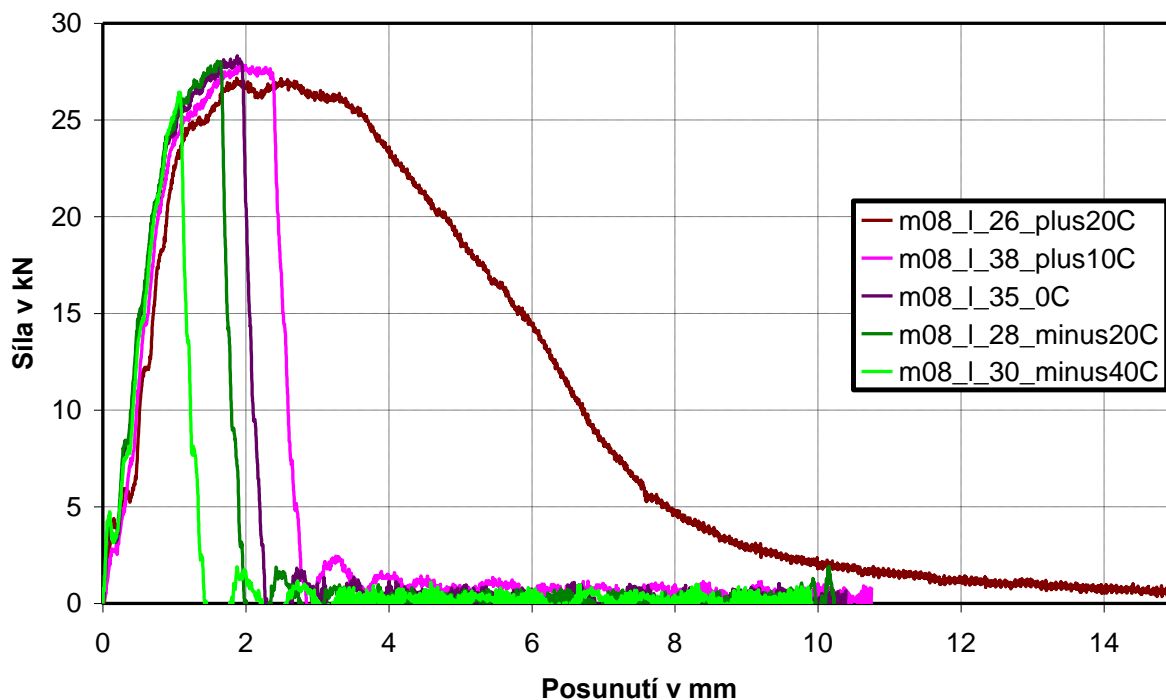


Obr. 60 Instrumentované záznamy za zkoušek rázem v ohybu, materiál m15, 20°C

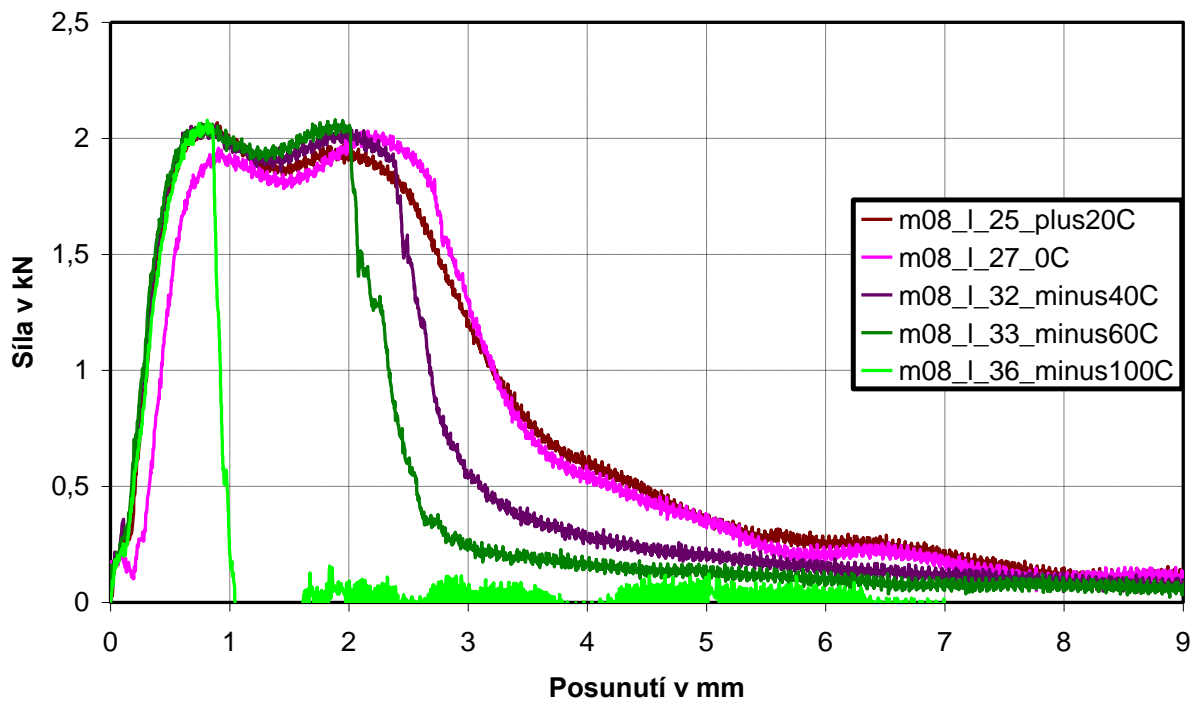
6.3.3. Výsledky měření přechodové teploty $FATT_{50}$

Na vybraných ocelích byla měřena přechodová teplota $FATT_{50}$. Byla použita standardní tělesa 10x10x55 mm a dále mini-Charpy tělesa s V-vrubem. Testy byly provedeny pro oceli s mikrostrukturou m06 a m15. Vyhodnocení křehkého lomu bylo provedeno z instrumentovaných záznamů dle rovnice (12). Výsledky měření jsou shrnuty v **Tab. 14** - **Tab. 18**. Záznamy zkoušek jsou zobrazeny na **Obr. 61** - **Obr. 64**. Přechodové křivky pro vyhodnocení $FATT_{50}$ z podílu křehkého a houževnatého lomu jsou zobrazeny na **Obr. 65** - **Obr. 68**. Vyhodnocené přechodové teploty jsou shrnuty v **Tab. 19**.

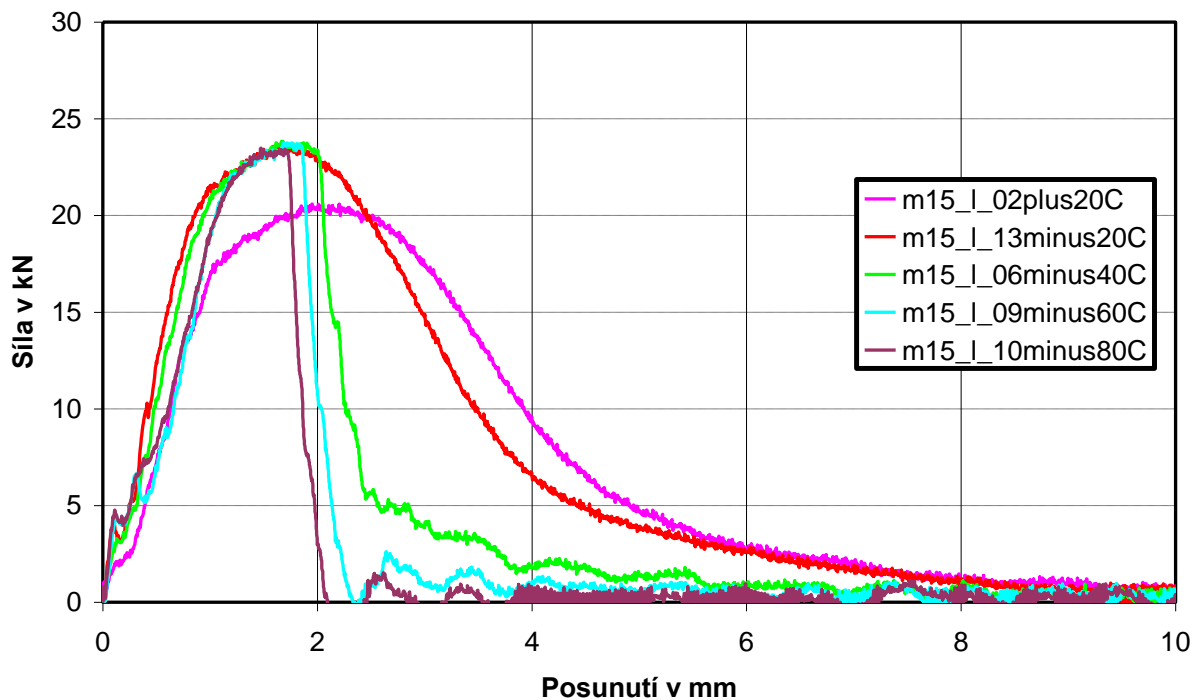
Naměřené teploty $FATT_{50}$ ukazují, že velikostní faktor zásadním způsobem ovlivňuje naměřené výsledky. Dále budou získané výsledky sloužit jako referenční zkoušky pro porovnání přechodové teploty získané ze zkoušek SPT.



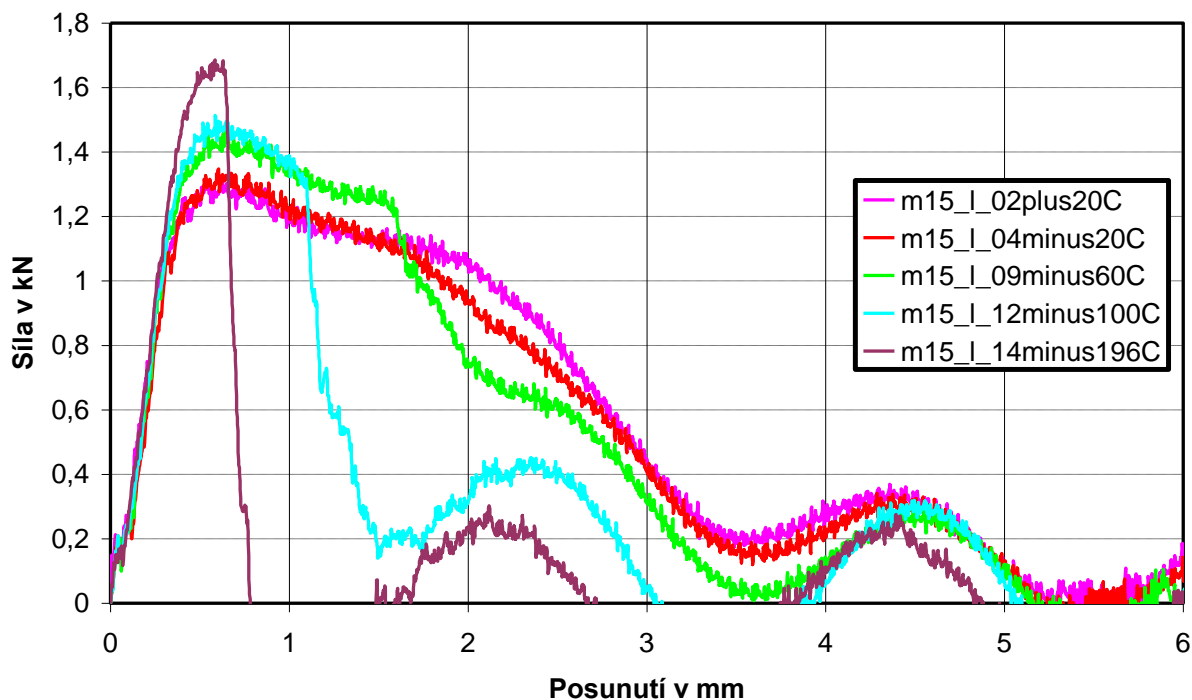
Obr. 61 Instrumentované záznamy za zkoušek rázem v ohybu, materiál m08, 10x10 mm



Obr. 62 Instrumentované záznamy za zkoušek rázem v ohybu, materiál m08, 3x4 mm



Obr. 63 Instrumentované záznamy za zkoušek rázem v ohybu, materiál m15, 10x10 mm



Obr. 64 Instrumentované záznamy za zkoušek rázem v ohybu, materiál m15, 3x4 mm

Tab. 15 Výsledky zkoušek rázem v ohybu dle Charpyho, materiál m08, 10x10 mm

Vzorek	Vrub V	Rozměry		Hloubka vrubu mm	Teplota °C	KV J	KCV J/cm ²	Křehký lom				Podíl křehkého lomu %
		B mm	H mm					F _m kN	F _{iu} kN	F _a kN	F _{gy} kN	
m08_l_10x10_24	V	10,00	10,00	1,99	20	169,2	211,2	27,4	0,0	0,0	23,2	0,0
m08_l_10x10_25	V	10,00	10,00	1,99	20	160,3	200,1	27,2	0,0	0,0	23,9	0,0
m08_l_10x10_26	V	10,00	10,00	1,99	20	163,7	204,4	27,3	0,0	0,0	25,1	0,0
m08_l_10x10_27	V	10,00	10,00	1,99	-20	34,2	42,7					
m08_l_10x10_28	V	10,00	10,00	1,99	-20	44,6	55,7	28,1	28,1	0,0	26,1	96,4
m08_l_10x10_29	V	10,00	10,00	1,99	-20	25,6	32,0	26,0	26,0	0,0	26,0	100,0
m08_l_10x10_30	V	10,00	10,00	1,99	-40	22,8	28,5	26,5	26,5	0,0	26,5	100,0
m08_l_10x10_31	V	10,00	10,00	1,99	-40	23,0	28,7	26,1	26,1	0,0	26,1	100,0
m08_l_10x10_32	V	10,00	10,00	1,99	-40	22,4	28,0	26,3	26,3	0,0	26,3	100,0
m08_l_10x10_33	V	10,00	10,00	1,99	0	44,0	54,9	28,1	28,1	0,0	25,7	96,0
m08_l_10x10_34	V	10,00	10,00	1,99	0	59,6	74,4	28,8	28,2	0,0	25,2	92,1
m08_l_10x10_35	V	10,00	10,00	1,99	0	53,6	66,9	28,4	28,4	0,0	25,6	95,3
m08_l_10x10_36	V	10,00	10,00	1,99	10	53,5	66,8	27,6	27,1	0,8	24,1	89,3
m08_l_10x10_37	V	10,00	10,00	1,99	10	70,2	87,6	27,9	27,1	2,1	24,2	83,8
m08_l_10x10_38	V	10,00	10,00	1,99	10	67,1	83,8	27,8	27,4	1,4	24,6	88,6

Tab. 16 Výsledky zkoušek rázem v ohybu dle Charpyho, materiál m08, 3x4 mm

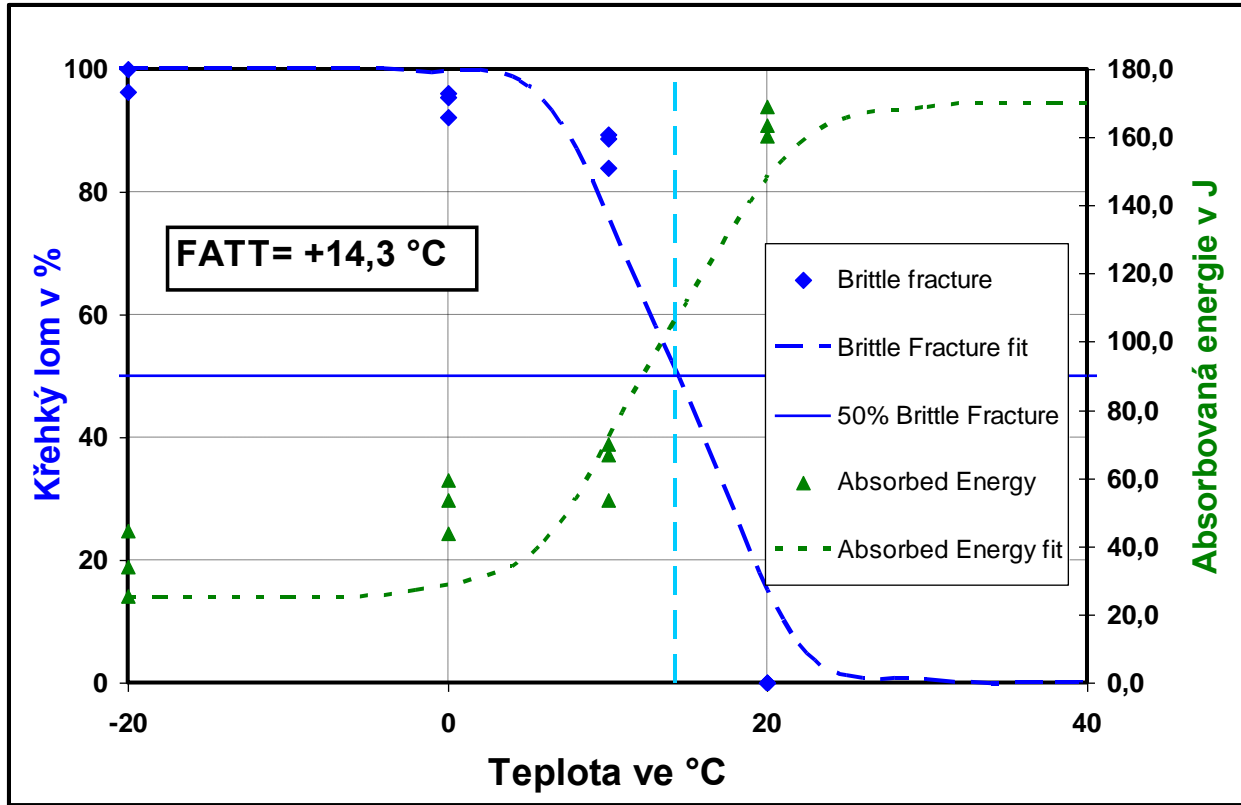
Vzorek	Vrub V	Rozměry		Hloubka vrubu mm	Teplota °C	KV J	KCV J/cm ²	Křehký lom				Podíl křehkého lomu %
		B mm	H mm					F _m kN	F _{iu} kN	F _a kN	F _{gy} kN	
m08_l_3x4_24	V	3,00	4,00	1,00	20	9,4	104,4	2,2	0,0	0,0	2,0	0,0
m08_l_3x4_25	V	3,00	4,00	1,00	20	8,6	95,6	2,0	0,0	0,0	2,0	0,0
m08_l_3x4_26	V	3,00	4,00	1,00	20	8,1	90,0	1,9	0,0	0,0	1,9	0,0
m08_l_3x4_27	V	3,00	4,00	1,00	0	8,5	94,4	2,0	1,7	1,5	1,8	
m08_l_3x4_28	V	3,00	4,00	1,00	0	8,3	92,2	1,9	1,6	1,3	1,8	10,9
m08_l_3x4_29	V	3,00	4,00	1,00	0	8,7	96,7	2,1	1,7	1,6	1,8	4,8
m08_l_3x4_30	V	3,00	4,00	1,00	-40	7,1	78,9	2,1	2,0	0,8	1,9	50,4
m08_l_3x4_31	V	3,00	4,00	1,00	-40	7,4	82,2	2,0	1,8	1,1	1,9	35,9
m08_l_3x4_32	V	3,00	4,00	1,00	-40	7,3	81,1	2,0	1,8	1,0	2,0	41,2
m08_l_3x4_33	V	3,00	4,00	1,00	-60	6,4	71,1	2,1	2,1	0,8	2,0	58,4
m08_l_3x4_34	V	3,00	4,00	1,00	-60	6,1	67,8	2,0	1,9	0,8	1,9	55,4
m08_l_3x4_35	V	3,00	4,00	1,00	-60	6,5	72,2	2,0	1,9	0,6	1,9	64,4
m08_l_3x4_36	V	3,00	4,00	1,00	-100	2,1	23,3	2,0	2,0	0,0	2,0	98,3
m08_l_3x4_37	V	3,00	4,00	1,00	-100	1,5	16,7					
m08_l_3x4_38	V	3,00	4,00	1,00	-100	1,6	17,8					

Tab. 17 Výsledky zkoušek rázem v ohybu dle Charpyho, materiál m15, 10x10 mm

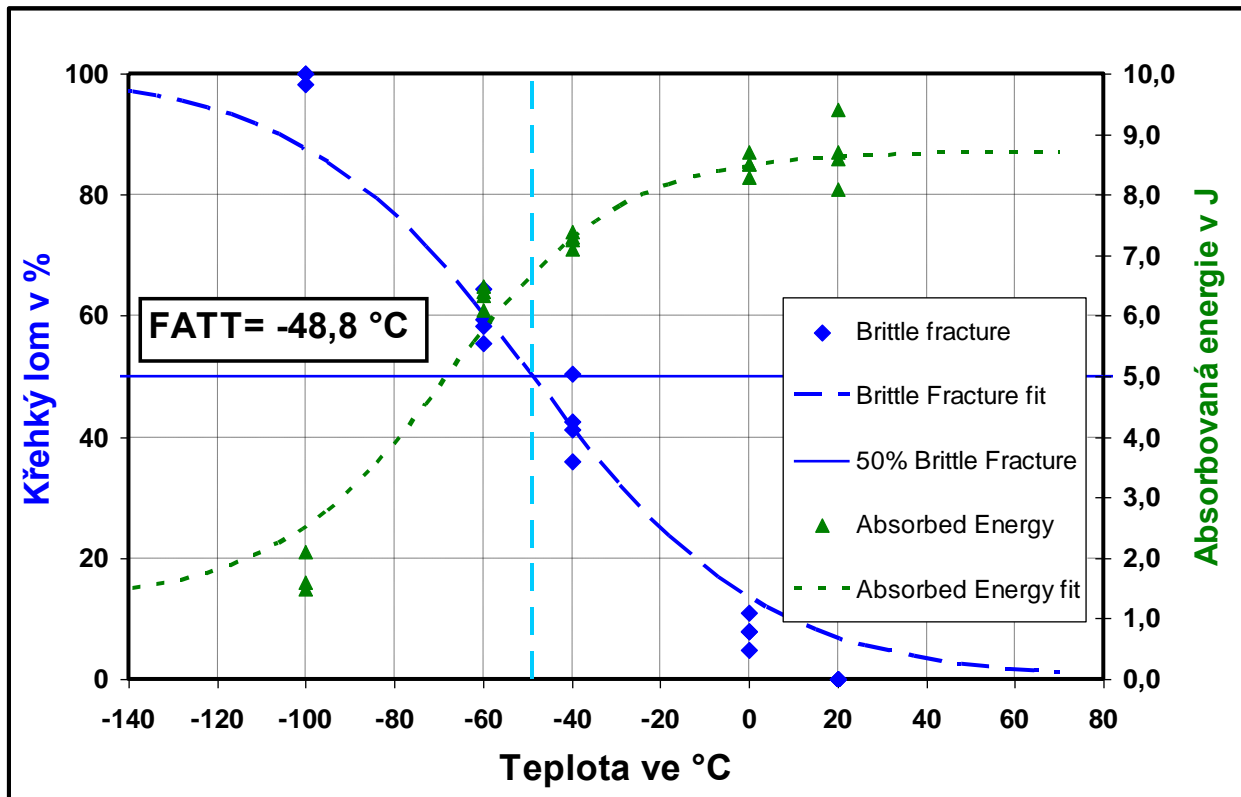
Vzorek	Vrub V	Rozměry		Hloubka vrubu mm	Teplota °C	KV J	KCV J/cm ²	Křehký lom				Podíl křehkého lomu %
		B mm	H mm					F _m kN	F _{iu} kN	F _a kN	F _{gy} kN	
m15_l_10x10_01	V	9,99	10,00	2,00	20	89,1	111,5	22,8	0,0	0,0	18,8	0,0
m15_l_10x10_02	V	9,99	10,00	2,00	20	89,9	112,5	20,6	0,0	0,0	15,6	0,0
m15_l_10x10_03	V	9,99	10,00	2,00	20	90,3	113,0	21,2	0,0	0,0	16,1	0,0
m15_l_10x10_04	V	9,99	10,00	2,00	-40	56,0	70,1	25,1	24,5	9,1	23,0	58,9
m15_l_10x10_05	V	9,99	10,00	2,00	-40	59,5	74,4	23,9	23,2	8,1	21,0	59,4
m15_l_10x10_06	V	9,99	10,00	2,00	-40	57,6	72,1	23,8	23,3	5,7	19,7	67,7
m15_l_10x10_07	V	9,99	10,00	2,00	-60	45,8	57,3	24,1	24,1	1,7	21,9	88,7
m15_l_10x10_08	V	9,99	10,00	2,00	-60	43,0	53,8	24,2	24,2	1,9	21,6	87,6
m15_l_10x10_09	V	9,99	10,00	2,00	-60	44,8	56,1	23,8	23,8	0,0	21,6	95,7
m15_l_10x10_10	V	9,99	10,00	2,00	-80	38,3	47,9	23,5	23,5	0,0	20,9	94,8
m15_l_10x10_11	V	9,99	10,00	2,00	-80	37,7	47,2	24,6	24,6	0,0	21,9	94,6
m15_l_10x10_12	V	9,99	10,00	2,00	-80	39,4	49,3	25,1	25,0	0,0	22,7	94,9
m15_l_10x10_13	V	9,99	10,00	2,00	-20	80,9	101,2	23,6	0,0	0,0	19,8	0,0
m15_l_10x10_14	V	9,99	10,00	2,00	-20	84,1	105,2	23,0	0,0	0,0	19,1	0,0
m15_l_10x10_15	V	9,99	10,00	2,00	-20	73,4	91,8	24,3	20,0	18,4	21,1	6,0

Tab. 18 Výsledky zkoušek rázem v ohybu dle Charpyho, materiál m15, 3x4 mm

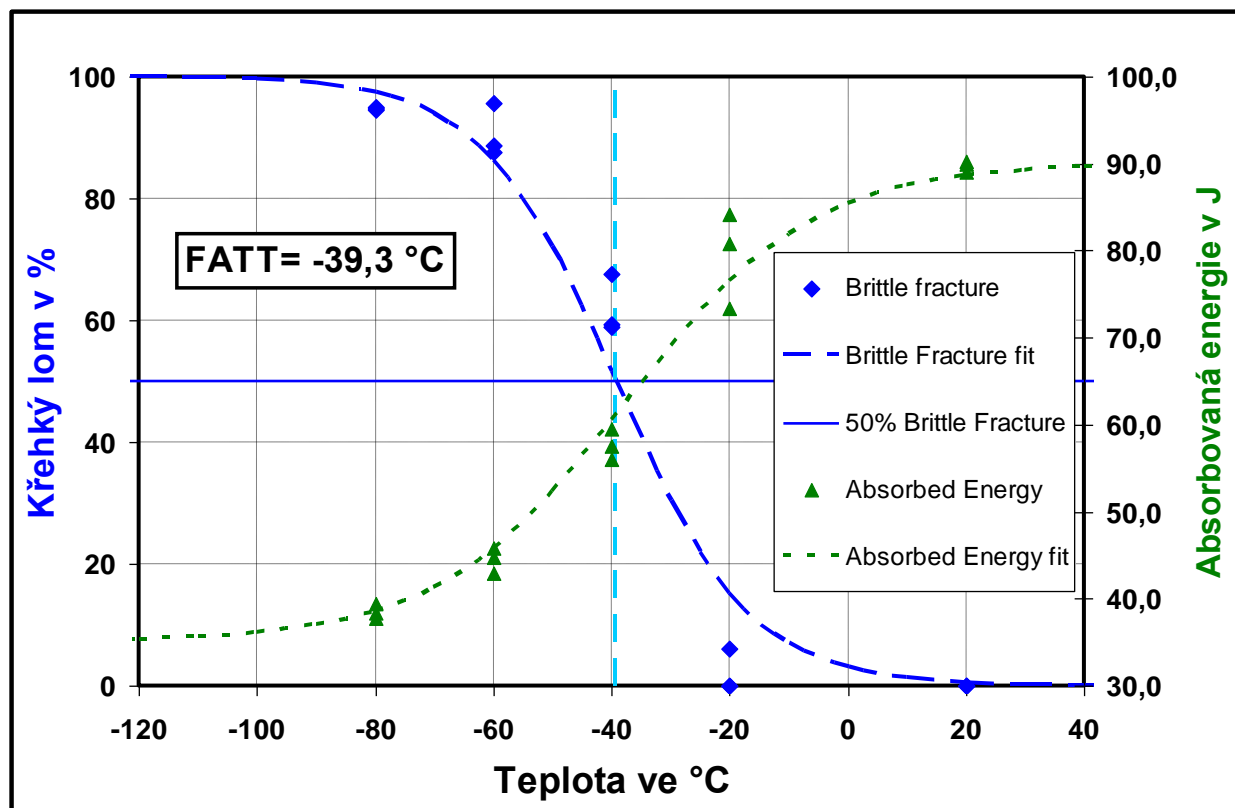
Vzorek	Vrub V	Rozměry		Hloubka vrubu mm	Teplota °C	KV J	KCV J/cm ²	Křehký lom				Podíl křehkého lomu %
		B mm	H mm					F _m kN	F _{iu} kN	F _a kN	F _{gy} kN	
m15_l_3x4_01	V	3,00	4,01	1,01	20	5,8	64,4	1,4	0,0	0,0	1,1	0,0
m15_l_3x4_02	V	3,00	4,01	1,01	20	5,7	63,3	1,3	0,0	0,0	1,2	0,0
m15_l_3x4_03	V	3,00	4,01	1,01	20	5,5	61,1	1,3	0,0	0,0	1,2	0,0
m15_l_3x4_04	V	3,00	4,01	1,01	-20	5,4	60,0	1,3	0,0	0,0	1,2	0,0
m15_l_3x4_05	V	3,00	4,01	1,01	-20	5,0	55,6	1,3	0,0	0,0	1,2	0,0
m15_l_3x4_06	V	3,00	4,01	1,01	-20	5,2	57,8	1,3	0,0	0,0	1,2	0,0
m15_l_3x4_07	V	3,00	4,01	1,01	-60	5,6	62,2	1,5	1,3	1,2	1,3	7,5
m15_l_3x4_08	V	3,00	4,01	1,01	-60	4,7	52,2	1,4	0,0	0,0	1,2	0,0
m15_l_3x4_09	V	3,00	4,01	1,01	-60	5,0	55,6	1,5	1,2	1,0	1,3	10,8
m15_l_3x4_10	V	3,00	4,01	1,01	-100	4,3	47,8	1,5	1,2	0,8	1,0	26,8
m15_l_3x4_11	V	3,00	4,01	1,01	-100	2,9	32,2	1,5	1,3	0,3	1,1	59,8
m15_l_3x4_12	V	3,00	4,01	1,01	-100	3,2	35,6	1,5	1,3	0,7	1,0	33,6
m15_l_3x4_13	V	3,00	4,01	1,01	-196	1,6	17,8	1,8	1,7	0,0	1,3	82,0
m15_l_3x4_14	V	3,00	4,01	1,01	-196	1,3	14,4	1,7	1,7	0,0	1,1	83,6
m15_l_3x4_15	V	3,00	4,01	1,01	-196	1,0	11,1	1,6	1,6	0,0	1,6	100,0



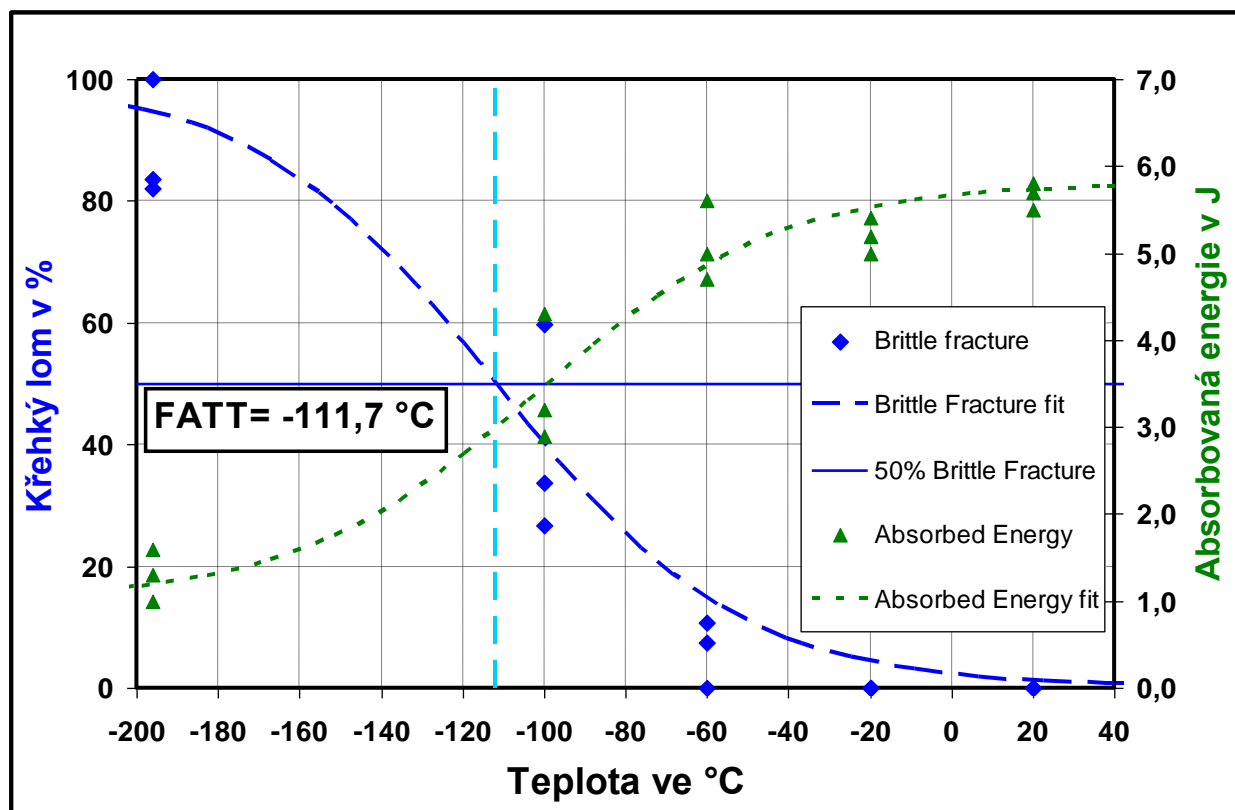
Obr. 65 Přejchodová křivka vyhodnocená z instrumentovaných záznamů, m08_10x10



Obr. 66 Přejchodová křivka vyhodnocená z instrumentovaných záznamů, m08_3x4



Obr. 67 Přejchodová křivka vyhodnocená z instrumentovaných záznamů, m15_10x10



Obr. 68 Přejchodová křivka vyhodnocená z instrumentovaných záznamů, m15_3x4

Tab. 19 Shrnutí výsledků měření přechodové teploty $FATT_{50}$

orientace vzorku	Materiál	velikost vzorku	přechodová teplota $FATT_{50}$ °C
podélně	m08	10x10x55 mm	+14,3
		3x4x27 mm	-48,8
	m15	10x10x55 mm	-39,3
		3x4x27 mm	-111,7

6.3.4. Diskuze výsledků zkoušek rázem v ohybu

Zkoušky rázem v ohybu byly provedeny na vzorcích různé velikosti za účelem určení vlivu velikostního faktoru na získanou hodnotu nárazové práce a přechodovou teplotu $FATT_{50}$. Podkapitola 6.3.4.1 se zabývá vlivem velikosti zkušebních těles na naměřenou hodnotu KV , resp. KCV pouze při pokojové teplotě. V podkapitole 6.3.4.2 jsou diskutovány možné korelace $FATT_{50}$ mezi standardními a mini-Charpy tělesy.

6.3.4.1 Zkoušky rázem v ohybu při 20°C

Zkoušky rázem v ohybu při 20°C byly provedeny na vzorcích různé velikosti za účelem určení vlivu velikostního faktoru na získanou hodnotu nárazové práce, resp. vrubovou houževnatost. Z každé série zkoušek byl spočítán průměr hodnoty KCV a jednotlivé výsledky byly seřazeny dle rozměru zkušebního tělesa (resp. jeho průřezu), zkoumaného materiálu a směru odběru zkušebního tělesa vzhledem k polotovaru. Zároveň je pro každou hodnotu uveden průměrný podíl křehkého lomu vypočítaný z instrumentovaných záznamů dle rov. (12). Tyto výsledky jsou uvedeny v **Tab. 20**. Modře jsou zvýrazněné hodnoty, které byly naměřeny na vzorcích s redukovanou nejen šířkou, ale také výškou.

Grafické reprezentace výsledků KCV jsou zobrazeny na **Obr. 69 – Obr. 73**. Z průběhu hodnot je zřejmé, že pro zkoumané materiály platí pravidlo, že s klesající velikostí zkušebního tělesa klesá také vrubová houževnatost. Výjimku z tohoto pravidla tvoří materiál m08, u kterého se některé tyče porušily křehkým lomem – tyče s rozměry 10x10x55 mm a 10x7,5x55 mm v příčném směru a tyče s rozměry 10x7,5x55 mm v podélném směru.

Pro kvantifikaci tohoto poklesu byly hodnoty KCV normalizovány hodnotou naměřenou na standardních tělesech a vyjádřeny relativně v % (tj. tyče 10x10x55 mm mají vždy hodnotu KCV 100 %). Zároveň byly vynechány tyče, které se porušily křehkým lomem a tyče s jinou výškou než 10mm (pro délku 55 mm). Porovnání normalizovaných hodnot KCV je shrnuto v **Tab. 21** a grafická reprezentace je znázorněna na **Obr. 74**. Jelikož normalizované hodnoty KCV pro standardní tělesa jsou z definice 100 %, splývají všechny materiály pro průřez 80 mm² v jednom bodě. Z měřených materiálů se hodnoty normalizovaných hodnot KCV pro mini-Charpy tělesa pohybují od 39 % do 66 % ve srovnání se standardními Charpy tělesy. Spojnice těchto třech bodů (nahore proložené lineární a dole exponenciální křivkou) tvoří obálku, ve které se pohybují hodnoty KCV pro všechny ostatní zkušební tyče.

Obecný přepoččet vrubové houževnatosti měřené na tyčích různých velikostí neexistuje [22], ale na základě naměřených výsledků se jeví pravděpodobná hypotéza, že (za předpokladu tvárného porušení) se snižujícím se průřezem zkušebního tělesa se snižují také naměřené hodnoty KCV . Příčinu tohoto jevu částečně vysvětluje kapitola v teoretické části 3.2.

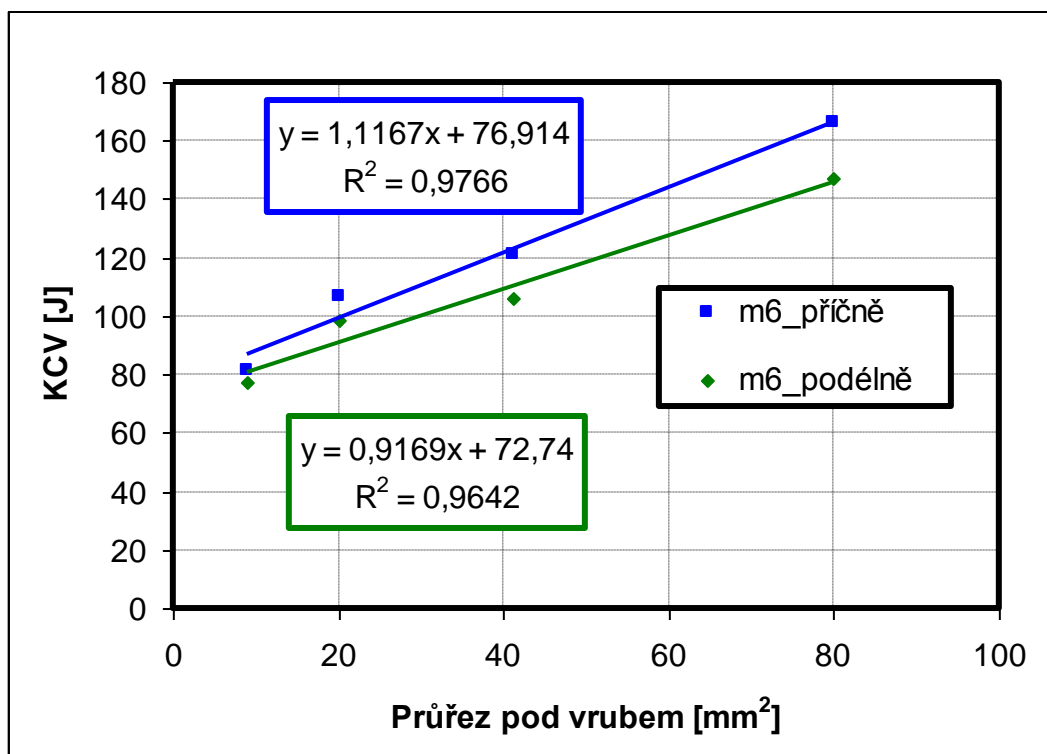
Pokud se však vyskytne alespoň částečný křehký lom u standardního tělesa, tento předpoklad přestává platit. V tomto případě se začínají uplatňovat dva protichůdné trendy, tedy to, že se snižující se tloušťkou tělesa je potlačována náchylnost ke křehkému lomu (houževnatost roste),

zároveň však díky tomu klesá nárazová práce na jednotku průřezu (jak se dá předpokládat z naměřených hodnot pro houževnaté porušení a z literatury [16], viz kap. 3.2). Trend hodnot **KCV** již nelze v těchto případech predikovat.

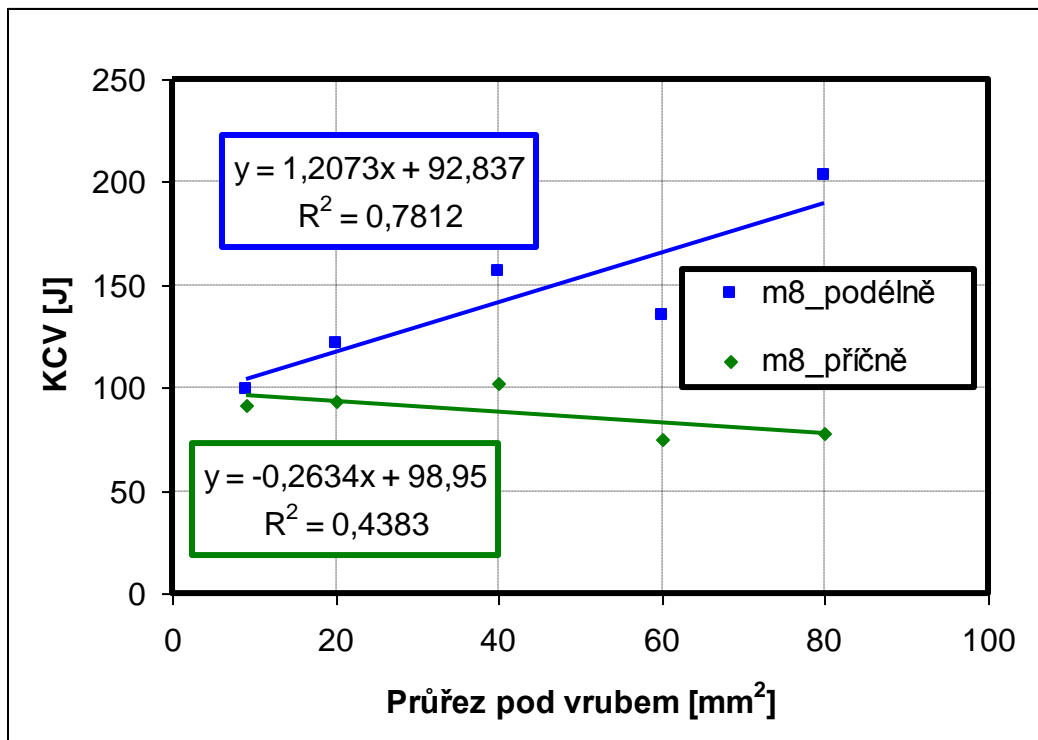
Protichůdnost těchto dvou trendů lze ilustrovat na **Obr. 75**, kde je zachycen průběh hodnot **KCV** pro materiál m08 v závislosti na velikosti zkušební tělesa a křehkého podílu v lomu. Pro větší tyče (10x10x55 mm a 10x7,5x55 mm) je podíl křehkého lomu (BF) kolem 80% a **KCV** se výrazně nemění. Při dalším poklesu velikosti zkušebních těles se BF náhle snižuje a u zkušebních těles 10x5x55 mm s BF 14,1% vzrostla průměrná **KCV** na hodnotu 131% hodnoty standardního zkušební tělesa. Od tohoto průřezu se tedy tělesa s klesající velikostí porušovaly převážně tvárným způsobem a při dalším snížení průřezu těles **KCV** klesá stejně jako u zbylých materiálů.

Tab. 20 Shrnutí výsledků naměřených hodnot **KCV** s vyhodnocením křehkého lomu (BF)

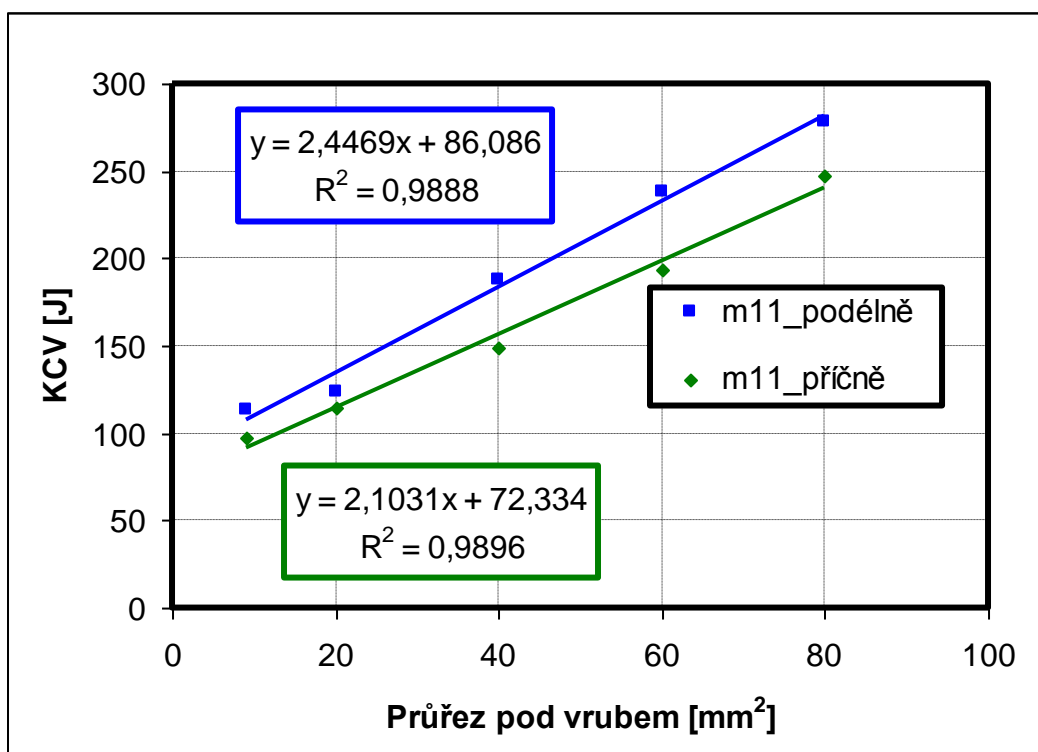
Rozměry vzorku [mm]	Průřez pod vrubem [mm ²]	m06				m08				m11				m15	
		podélně		příčně		podélně		příčně		podélně		příčně		podélně	
		KCV [J]	BF [%]	KCV [J]	BF [%]	KCV [J]	BF [%]	KCV [J]	BF [%]	KCV [J]	BF [%]	KCV [J]	BF [%]	KCV [J]	BF [%]
10x10x55	80	147,1	0,0	166,0	0,0	203,0	0,0	77,9	80,2	277,8	0,0	247,2	0,0	111,7	0,0
10x7,5x55	60					135,6	36,1	74,6	72,9	238,6	0,0	193,9	0,0		
7,5x7,5x55	41	105,8	0,0	120,9	0,0										
10x5x55	40					157,1	0,0	102,4	14,1	187,9	0,0	148,8	0,0		
5x5x55	20	98,5	0,0	106,7	0,0										
10x2,5x55	20					121,7	0,0	93,7	2,4	123,7	0,0	114,3	0,0		
3x4x27	9	77,4	0,0	81,8	0,0	99,1	0,0	91,1	0,0	113,9	0,0	96,9	0,0	62,9	0,0



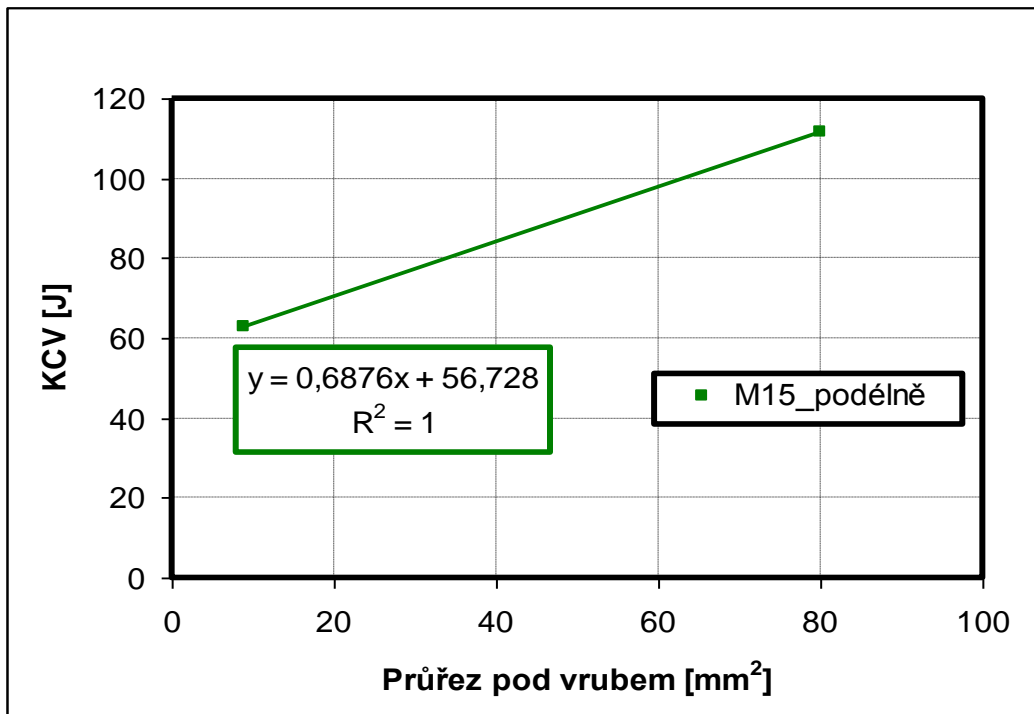
Obr. 69 Závislost výsledků KCV na průřezu pod vrubem, m06, +20°C



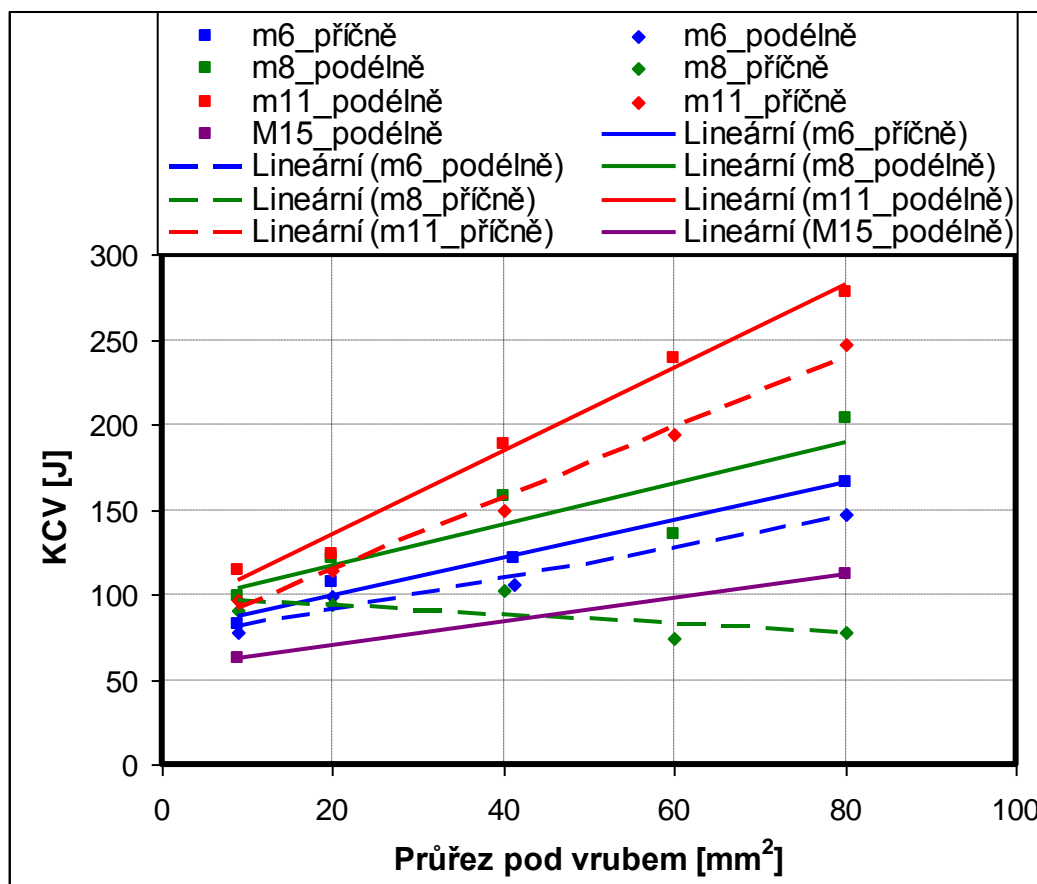
Obr. 70 Závislost výsledků KCV na průřezu pod vrubem, m08, +20°C



Obr. 71 Závislost výsledků KCV na průřezu pod vrubem, m11, +20°C



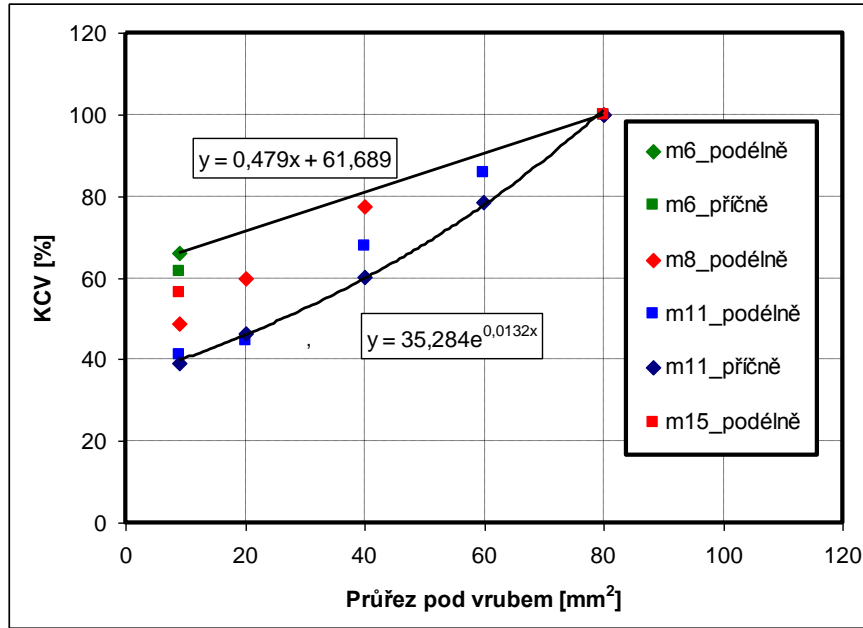
Obr. 72 Závislost výsledků KCV na průřezu pod vrubem, m15, +20°C



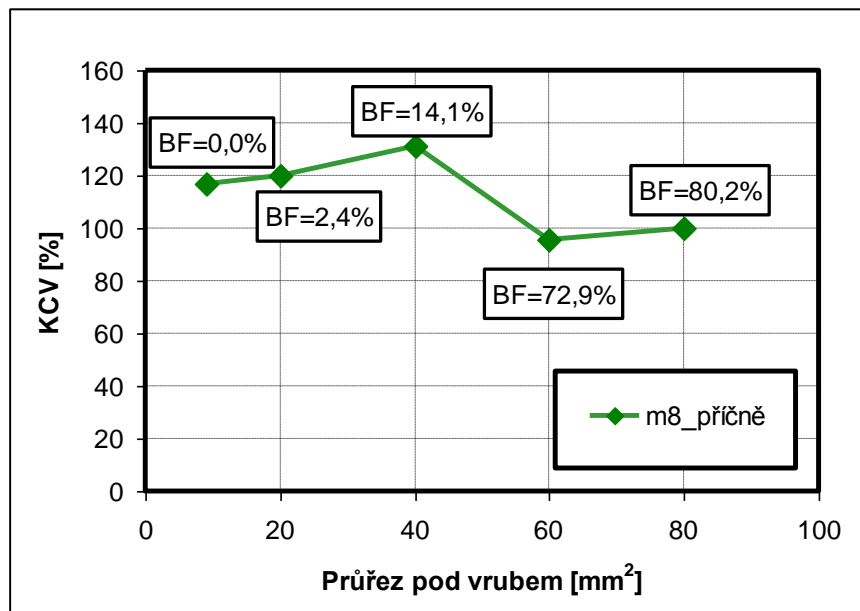
Obr. 73 Závislost výsledků KCV na průřezu pod vrubem pro všechny materiály, +20°C

Tab. 21 Výsledky normalizovaných hodnot *KCV* v %

Rozměry vzorku [mm]	Průřez pod vrubem [mm ²]	m06		m08	m11		m15
		podélně %	příčně %	podélně %	podélně %	příčně %	podélně %
10x10	80	100	100	100	100	100	100
10x7,5	60				86	78	
10x5	40			77	68	60	
10x2,5	20			60	45	46	
3x4x27	9	66	62	49	41	39	56



Obr. 74 Závislost výsledků *KCV* na průřezu pod vrubem vyjádřená v %, +20°C



Obr. 75 Závislost hodnoty *KCV* na průřezu pod vrubem pro materiál m08 v příčném směru s uvedením křehkého podílu lomu pro testovanou geometrii Charpy těles

6.3.4.2 Měření přechodových teplot $FATT_{50}$

Měření přechodových teplot $FATT_{50}$ bylo provedeno za účelem určení vlivu velikosti těles na hodnotu přechodové teploty.

Závislost mezi přechodovými teplotami stanovenými na vzorcích o standardní velikosti 10x10x55 mm a velikosti 3x4x27 mm byla popsána obecným vztahem (9), který předpokládá konstantní teplotní posun Δt .

V literatuře lze najít konkrétní korelační vztahy mezi přechodovými teplotami u různých rozměrů zkušebních těles vyhodnocenými jak z energie, tak z podílu křehkého lomu, např. teplotou $FATT$.

Jako příklad lze uvést vztah (56), uvedený v literatuře [71], mezi teplotami $FATT_{standard}$ a $FATT_{mini-Charpy}$ (použitý mini-Charpy vzorek se nepatrně liší od rozměrů uvedených v této práci).

$$FATT_{standard} = FATT_{mini-Charpy} + 53 (\pm 24) \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (56)$$

Na základě výsledků uvedených v **Tab. 19** byl vyhodnocen teplotní posun pro materiály m08 a m15 (viz **Tab. 22**) a platí pro ně vztahy (57) a (58).

Tab. 22 Teplotní posun pro materiály m08 a m15

Materiál	FATT [°C]		Δt °C
	Velikost tělesa [mm]		
	10x10	3x4	
m08	14,3	-48,8	63,1
m15	-39,3	-111,7	72,4

$$\text{m08: } FATT_{standard} = FATT_{mini-Charpy} + 63 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (57)$$

$$\text{m15: } FATT_{standard} = FATT_{mini-Charpy} + 72 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (58)$$

Naměřené hodnoty $FATT_{50}$ tedy s tímto vztahem v rámci rozptylu korespondují. V práci [11] autor naměřil pro ocelový svařenec podobný teplotní posun mezi standardními a podrozměrnými Charpy tělesy 3x4x27 mm, viz **Tab. 23**. Pro tyto materiály byl teplotní posun téměř konstantní a činil 60 (± 2) °C.

Tab. 23 Výsledky měření $FATT_{50}$ v práci [11]

Materiál	FATT [°C]		Δt °C
	Velikost tělesa [mm]		
	10x10	3x4	
BM 1	13,1	-48,38	61,5
HAZ 1	-11,7	-69,90	58,2
WM	52,1	-8,70	60,8
HAZ 2	21,1	-39,37	60,5
BM 2	30,6	-30,03	60,6

V následujícím textu budou mít hodnoty $FATT_{50}$ pro materiály m08 a m15 význam jako referenční hodnoty pro stanovení parametru α_{SPT} při korelaci přechodových teplot určených pomocí SPT.

6.4. Zkoušky lomové houževnatosti

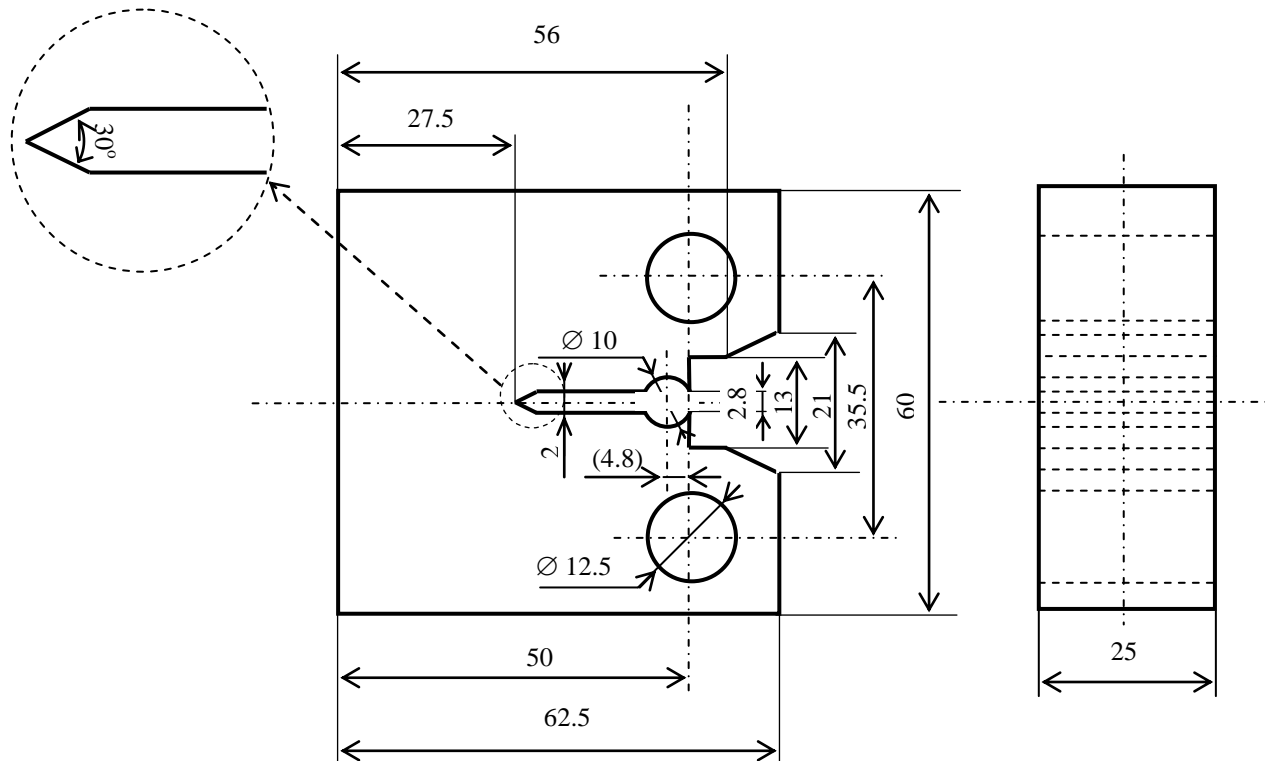
V rámci teoretické části (v kapitole 4.5) byly v obecné rovině vysvětleny základy měření LH včetně použitých těles, vzorců pro výpočet parametrů LH a způsobů měření – metodou více těles nebo jednoho tělesa. Následující text na tuto kapitolu navazuje s tím, že uvádí již konkrétní zkušební tělesa a podmínky zkoušení dle aplikovaných norem.

6.4.1. Provedení zkoušek

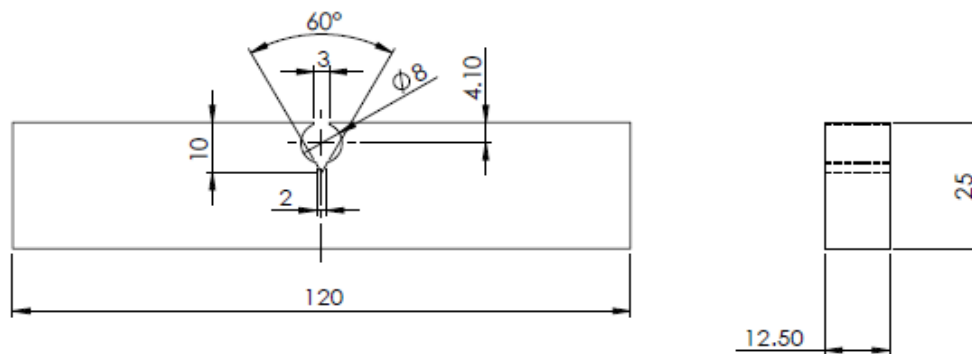
Zkoušky lomové houževnatosti byly provedeny dle *ASTM E1820-09* [8] (Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness) při pokojové teplotě na materiálech m11, m12, m14, m15, m17, m18, m19. Pro zkoušku lomové houževnatosti byly použity standardní 1T-CT tělesa (tělesa typu Central Tension o tloušťce 25mm) dle **Obr. 76** a tělesa pro tříbodový ohyb dle **Obr. 77** s průřezem 15x30 mm nebo 10x20 mm a s roztečí podpor rovnající se čtyřnásobku výšky zkušebního tělesa. Značení orientace odběru těles vzhledem k polotovaru dle americké normy ASTM 399 [72] je znázorněna na **Obr. 78**. V **Tab. 24** jsou shrnuty orientace zkušebních těles pro všechny materiály, na kterých byly provedeny testy lomové houževnatosti.

Před vlastní zkouškou byly ve všech případech na vzorcích nakmitány únavaové trhliny na magnetorezonančním stroji se závěrečným faktorem intenzity napětí $18 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$. Po nakmitání zkušebních těles byly na vzorcích vyrobeny boční vruby o hloubce 1/10 šířky zkušebního tělesa z každé strany.

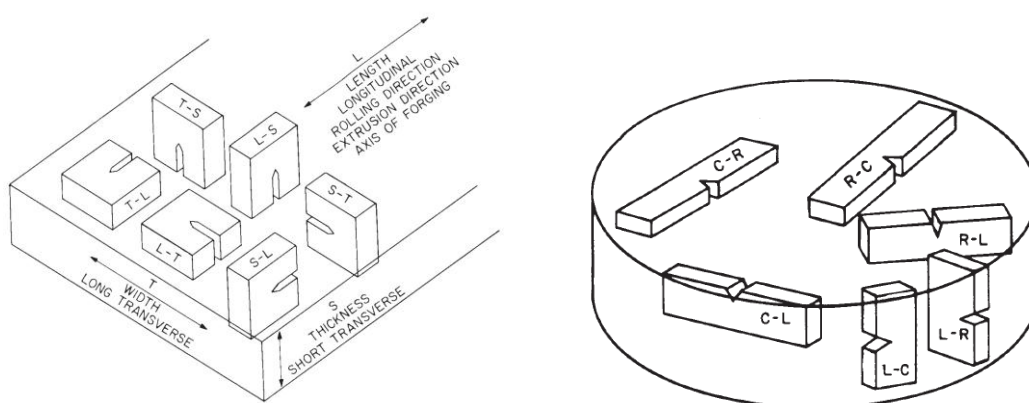
V následujícím textu budou zkoušky rozděleny dle toho, zda byla použita metoda jednoho tělesa (single specimen method; unloading compliance - UC, viz kap. 4.5.2.2) nebo metoda více těles (multiple specimens method, viz kap. 4.5.2.1).



Obr. 76 Geometrie CT tělesa pro zkoušky lomové houževnatosti



Obr. 77 Těleso zatížené třibodovým ohybem (SE(B) vzorek)



Obr. 78 Značení odběru zkušebních těles pro obdélníkový a kulatý polotovaru pro měření lomové houževnatosti [72]

Tab. 24 Orientace odběru zkušebních těles pro měření LH vůči polotovaru

Materiál	Orientace
m11	L-C
m12	L-C
m14	T-L
m15	T-L
m17	T-L
m18	T-L
m19	T-L

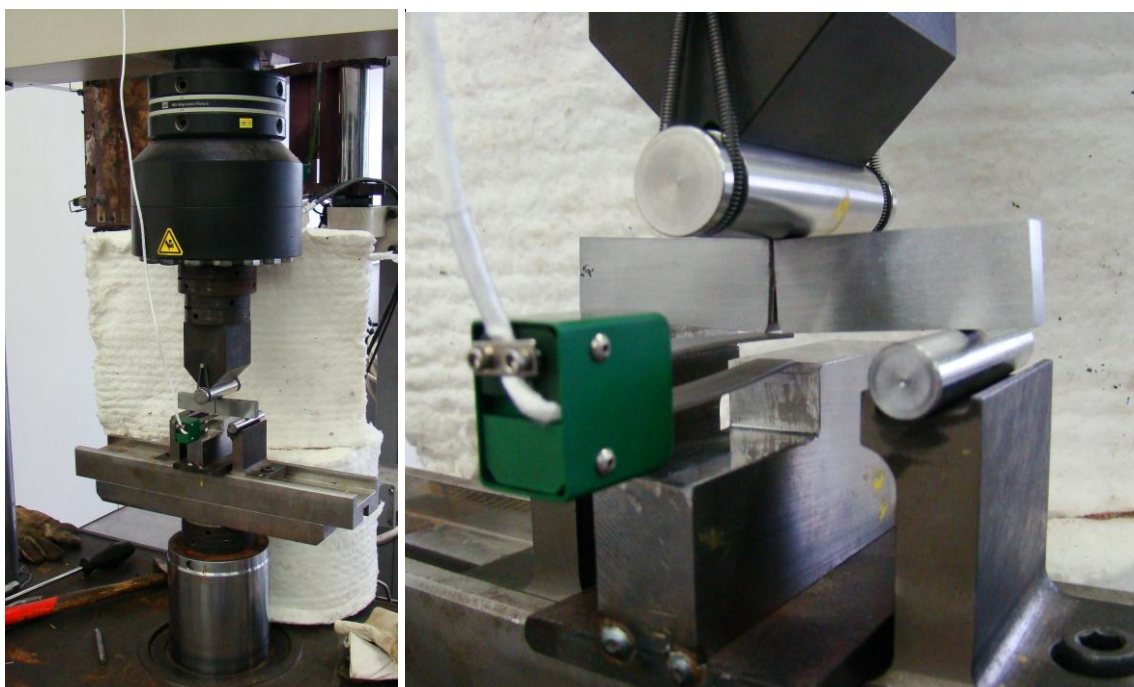
6.4.2. Provedení zkoušek metodou více těles

Tyto zkoušky byly provedeny na vzorcích pro třibodový ohyb. Materiály m11, m12 a m15 vykazovaly plně houževnaté chování a pro vyhodnocení byl použit koncept J-R křivky. Materiál m14 se porušoval ve všech případech křehce a tudíž byla vyhodnocena jen hodnota K_{IC} , resp. J_{IC} . Pro určení J-R křivky bylo použito devět platných vzorků pro každý z materiálů m11 a m15 a šest platných vzorků pro materiál m12. Protože se materiál m14 porušoval křehce, byla k určení K_{IC} použity jen čtyři zkušební tělesa.

Vyhodnocení bylo provedeno dle *ASTM E1820-09* [8]. Testy byly prováděny na servohydraulickém zkušebním stroji MTS 810 a deformace byla měřena COD extenzometrem.

Měřicí sestava je znázorněna na **Obr. 79**. Po vlastní zkoušce byla zkušební tělesa napuštěna na barvu pomocí žhánání za vyšší teploty, což bylo provedeno z důvodů zviditelnění oblasti stabilního nárůstu trhliny pro jeho následné měření. Po žhánání byla tělesa ochlazena v tekutém dusíku a rozlomena křehce, aby nedošlo k plastické deformaci tělesa a tudíž ke zkreslení při optickém měření délek trhlin (viz **Obr. 80**). Obarvené těleso po zkoušce se schematicky vyznačenými oblastmi je vyobrazeno na **Obr. 81**. Opticky byla změřena počáteční a konečná délka trhliny a byl vypočten J-integrál na základě rovnic (26), (27) a (59). Příklady záznamu zkoušek jsou znázorněny na **Obr. 82 - Obr. 85**. J-R křivky naměřené pro jednotlivé materiály jsou na **Obr. 86 - Obr. 88**. Vyhodnocené výsledky zkoušek jsou uvedeny v **Tab. 25 - Tab. 28**.

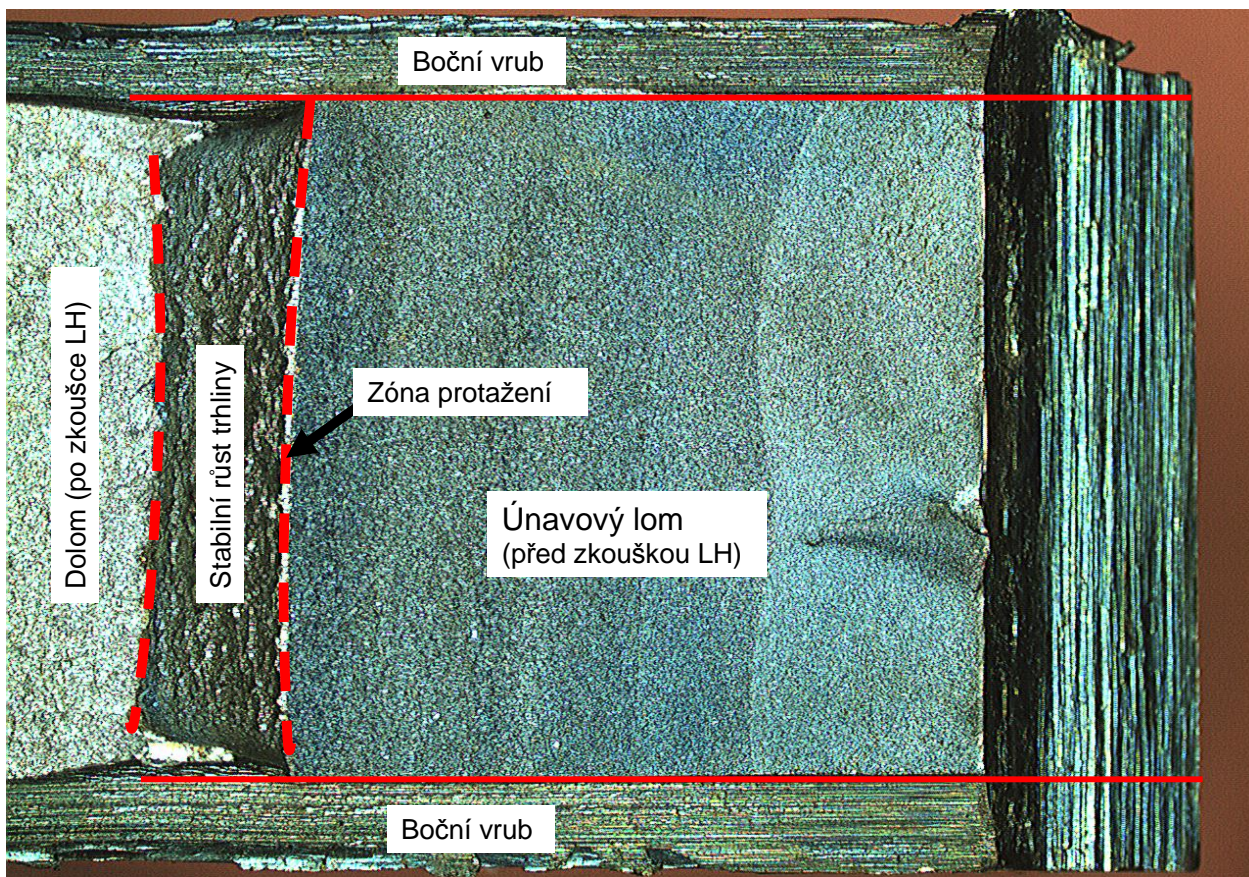
$$J_i = \frac{K_i^2(1-\nu^2)}{E} + \left[\frac{1,9 \cdot A_{pl}}{b_0 \cdot B_N} \right] \cdot \left[1 - \frac{\Delta a_i}{b_0} \right] \quad (59)$$



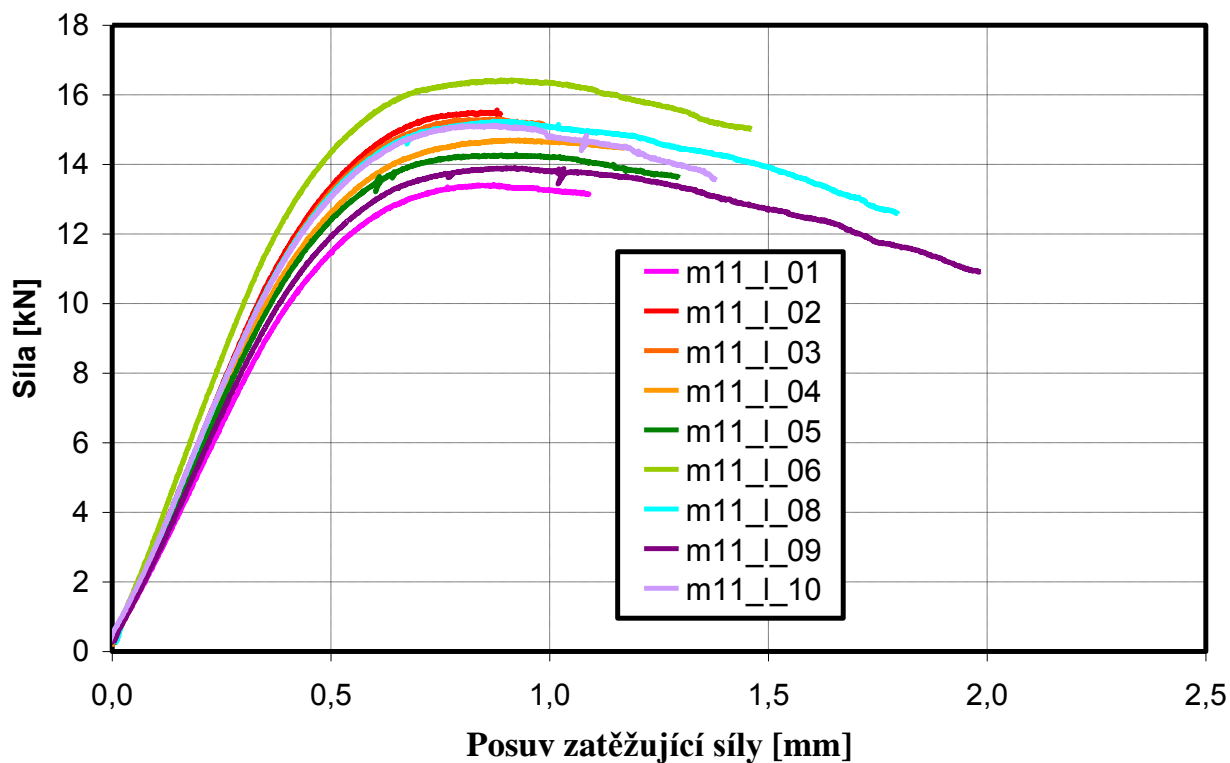
Obr. 79 Měřicí sestava pro měření lomové houževnatosti třibodovým ohybem



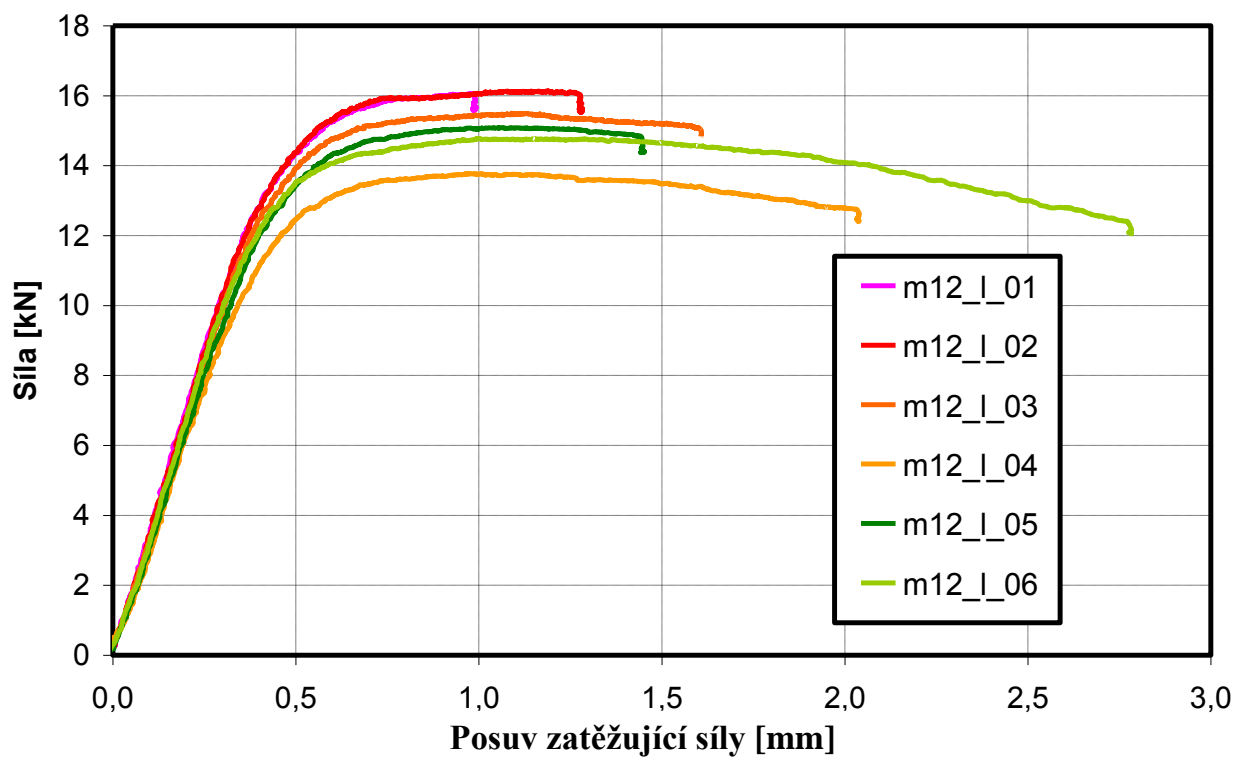
Obr. 80 Postup při zabarvování těles a křehkém dolomení po zkoušce LH



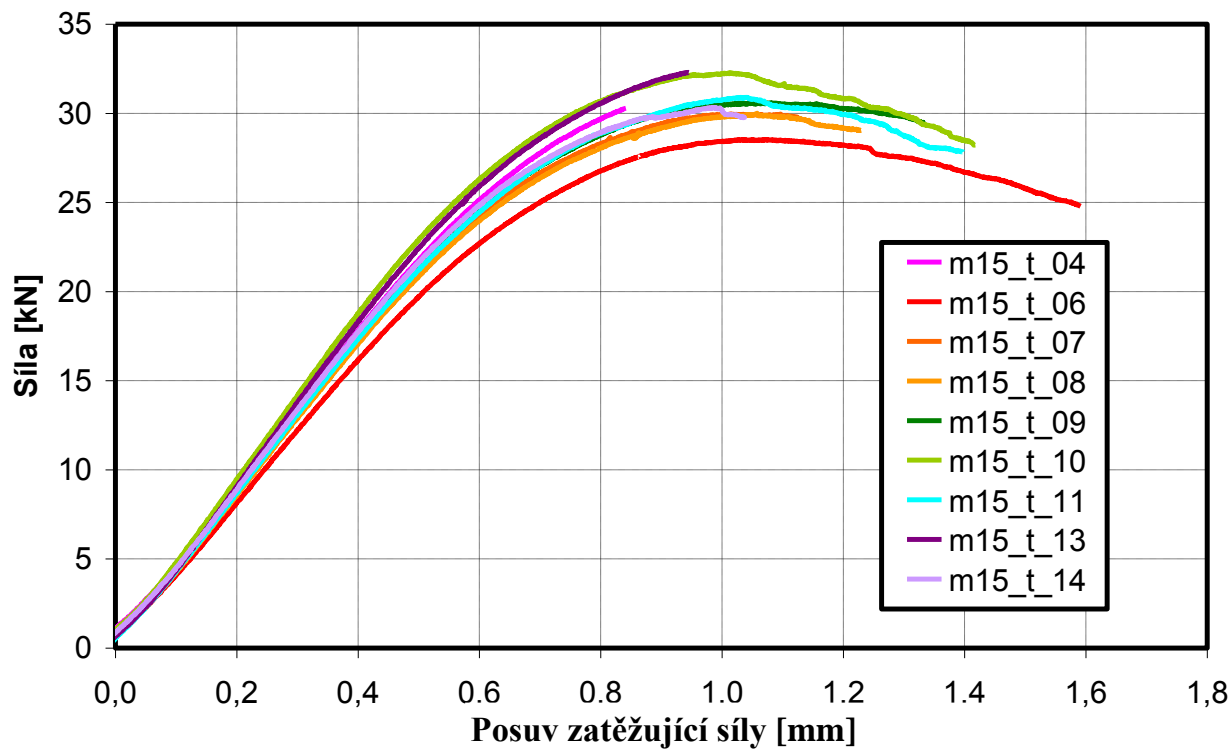
Obr. 81 Ukázka obarveného tělesa po zkoušce LH, m11_l_09



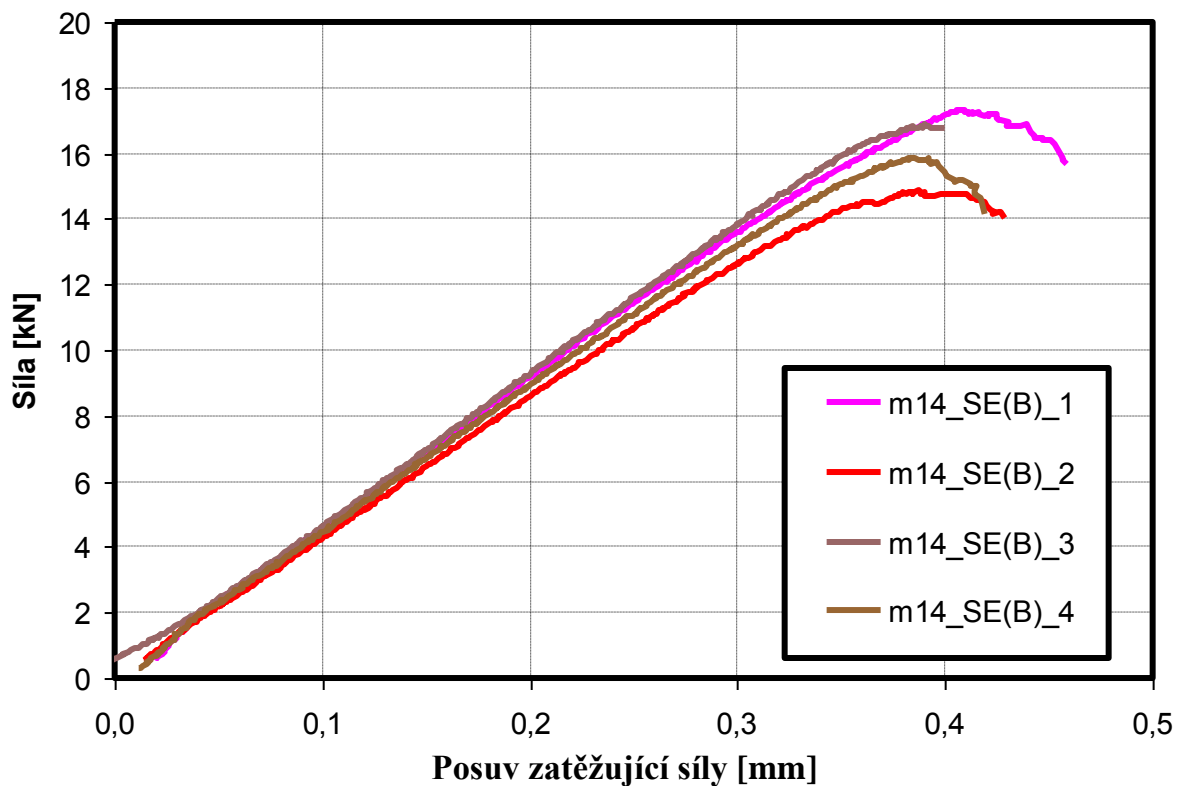
Obr. 82 Záznamy testů lomové houževnatosti, materiál m11, 20°C



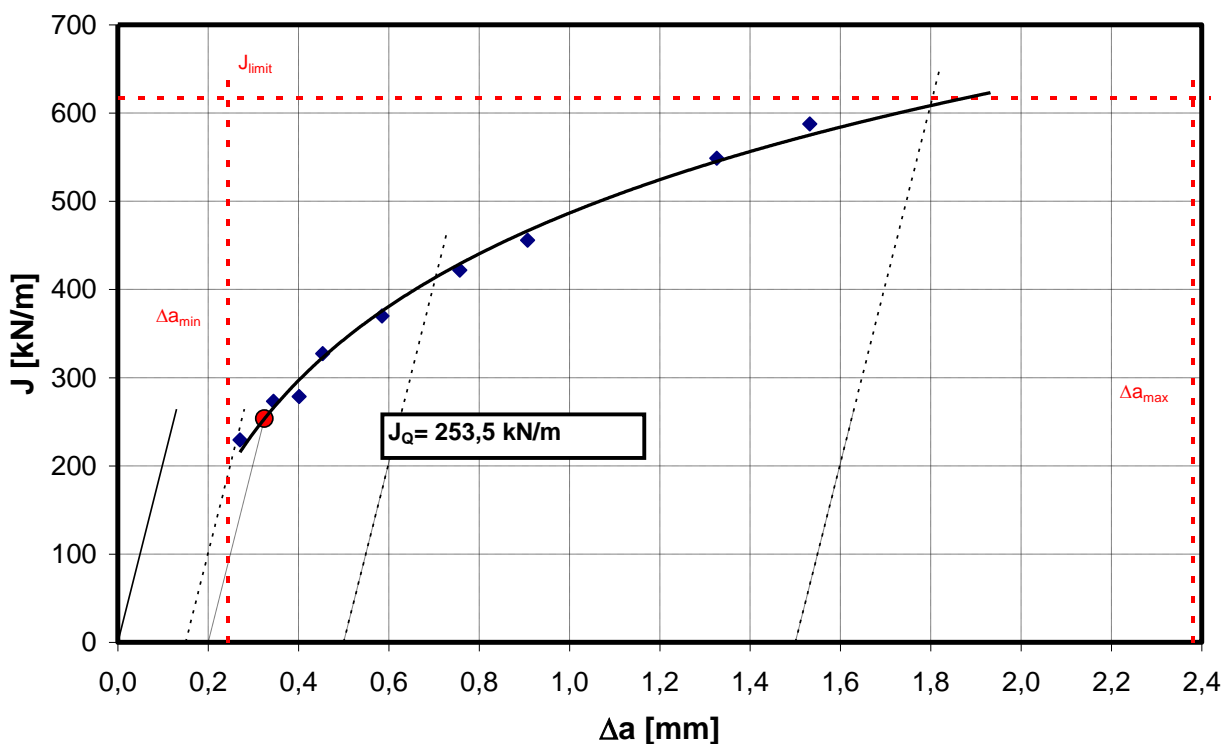
Obr. 83 Záznamy testů lomové houževnatosti, materiál m12, 20°C



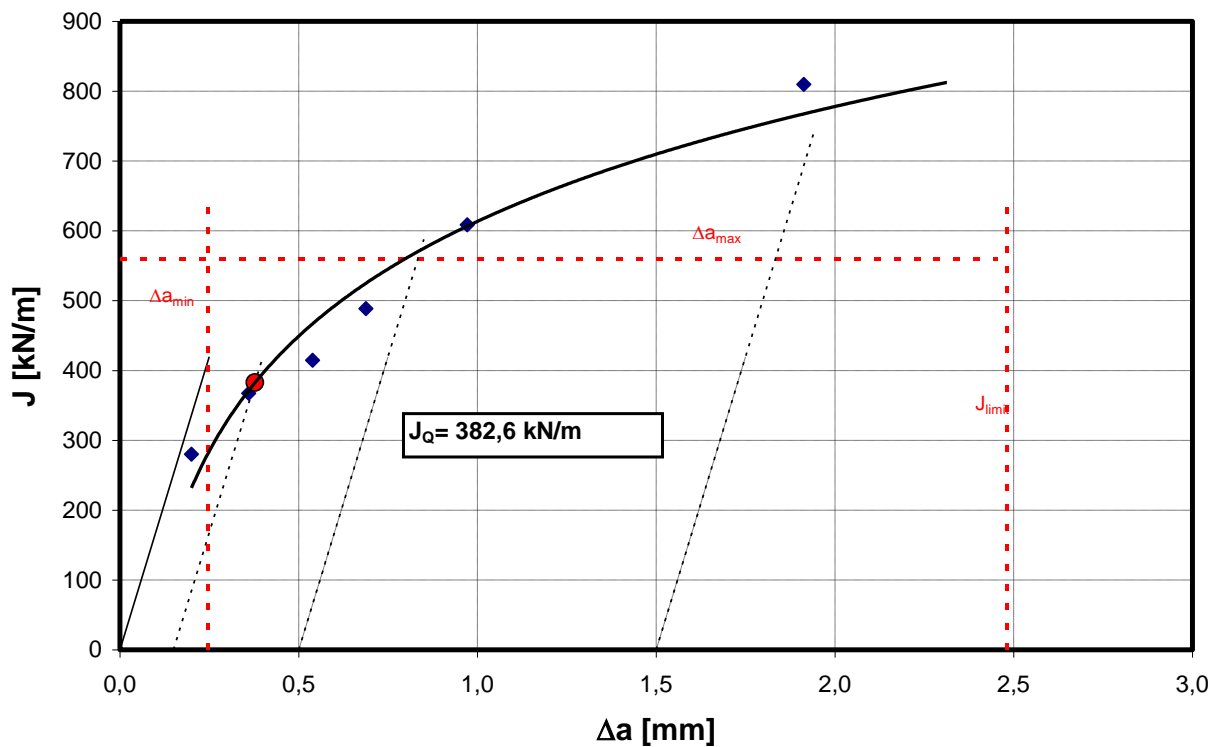
Obr. 84 Záznamy testů lomové houževnatosti, materiál m15, 20°C



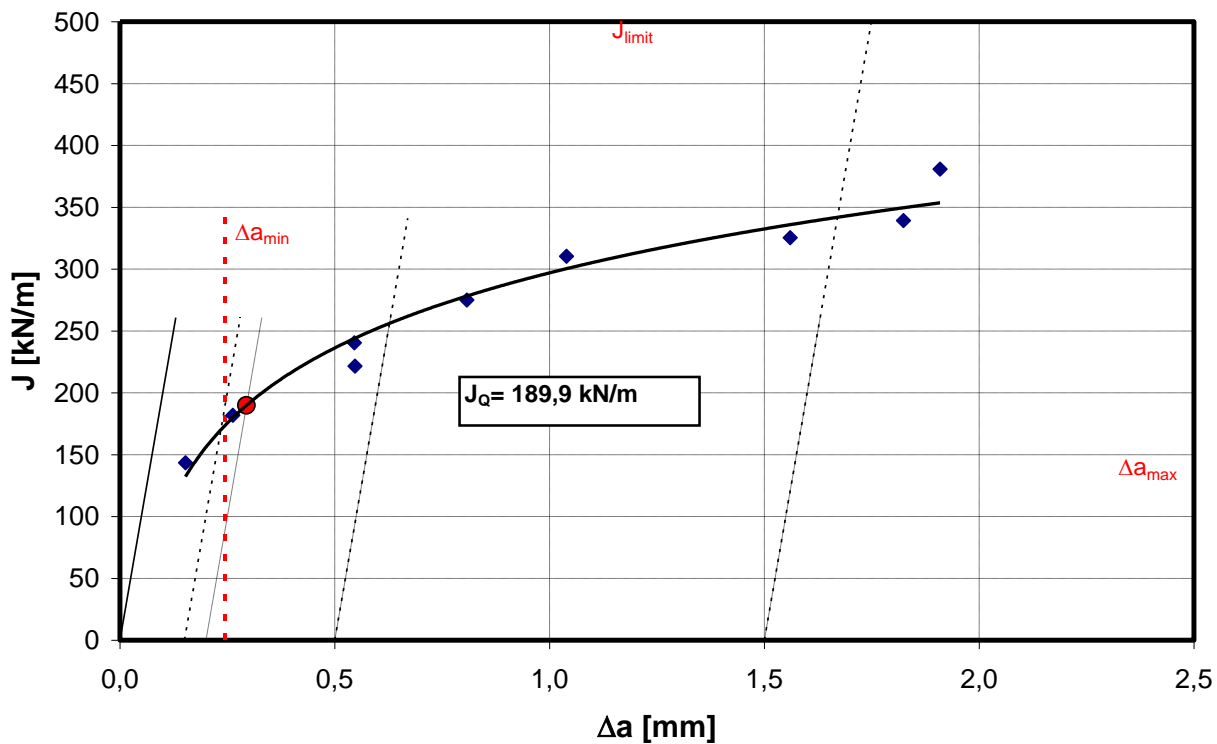
Obr. 85 Záznamy testů lomové houževnatosti, materiál m14, 20°C



Obr. 86 J-R křivka pro materiál m11, 20°C



Obr. 87 J-R křivka pro materiál m12, 20°C



Obr. 88 J-R křivka pro materiál m15, 20°C

Tab. 25 Shrnutí měření lomové houževnatosti pro materiál m11, 20°C

Vzorek	Δa [mm]	S [mm]	W mm	B mm	B_n mm	a_0 mm	a_1 mm	F_m kN	F_i kN	A_{tot} J	A_{el} J	A_{pl} J	J_{el} kN/mm	J_{pl} kN/mm	J kN/m	K_J MPa·m ^{1/2}
m11_l_01	0,40	80,00	19,98	10,00	7,97	10,87	11,28	13,4	13,1	10,82	3,31	7,51	0,08	0,20	278,49	251,05
m11_l_02	0,27	80,00	19,98	10,00	7,99	10,39	10,66	15,6	15,4	9,46	3,92	5,54	0,09	0,14	229,39	227,85
m11_l_03	0,34	80,00	19,98	10,00	7,83	10,42	10,77	15,3	15,1	10,88	3,77	7,11	0,09	0,19	273,29	248,70
m11_l_04	0,45	80,00	19,98	10,00	8,05	10,51	10,97	14,7	14,5	13,22	3,56	9,66	0,08	0,25	327,36	272,19
m11_l_05	0,58	80,00	19,98	10,00	8,00	10,63	11,21	14,3	13,6	14,44	3,21	11,23	0,08	0,29	369,90	289,33
m11_l_06	0,91	80,00	19,98	10,00	8,07	9,91	10,82	16,4	15,1	19,28	3,37	15,91	0,08	0,37	455,93	321,22
m11_l_08	1,33	80,00	19,98	10,00	8,00	10,28	11,61	15,2	12,6	22,12	2,60	19,52	0,08	0,47	548,75	352,40
m11_l_09	1,53	80,00	19,98	10,00	7,97	10,80	12,34	13,9	10,8	22,43	2,16	20,27	0,08	0,51	587,60	364,67
m11_l_10	0,76	80,00	19,98	10,00	7,94	10,40	11,16	15,1	13,5	16,44	3,02	13,42	0,08	0,34	421,81	308,97

Tab. 26 Shrnutí měření lomové houževnatosti pro materiál m12, 20°C

Vzorek	Δa [mm]	S [mm]	W mm	B mm	B_n mm	a_0 mm	a_1 mm	F_m kN	F_i kN	A_{tot} J	A_{el} J	A_{pl} J	J_{el} kN/mm	J_{pl} kN/mm	J kN/m	K_J MPa·m ^{1/2}
m12_l_01	0,20	80,00	20,00	10,00	8,19	10,00	10,21	16,1	16,0	11,86	3,65	8,21	0,08	0,20	280,04	248,09
m12_l_02	0,36	80,00	20,00	10,00	8,27	9,83	10,19	16,0	16,1	16,29	3,82	12,47	0,08	0,29	367,19	284,08
m12_l_03	0,69	80,00	20,00	10,00	8,11	9,98	10,66	15,5	15,0	20,81	3,44	17,37	0,08	0,41	488,52	327,67
m12_l_04	0,97	80,00	20,00	10,00	8,07	10,63	11,60	13,8	12,7	23,96	2,65	21,31	0,07	0,53	608,78	365,78
m12_l_05	0,54	80,00	20,00	10,00	8,15	10,07	10,60	15,1	14,8	17,69	3,49	14,20	0,07	0,34	414,71	301,90
m12_l_06	1,91	80,00	20,00	10,00	8,05	9,95	11,86	14,8	12,3	35,41	2,29	33,12	0,07	0,74	809,85	421,89

Tab. 27 Shrnutí měření lomové houževnatosti pro materiál m15, 20°C

Vzorek	Δa [mm]	S [mm]	W mm	B mm	B_n mm	a_0 mm	a_1 mm	F_m kN	F_i kN	A_{tot} J	A_{el} J	A_{pl} J	J_{el} kN/mm	J_{pl} kN/mm	J kN/m	K_J MPa·m ^{1/2}
m15_t_04	0,15	120,00	30,00	14,91	12,33	15,24	15,39	30,3	30,2	14,77	10,18	4,59	0,09	0,05	143,32	174,80
m15_t_06	1,91	120,00	30,00	14,91	12,43	16,03	17,94	28,5	24,7	33,91	7,50	26,41	0,10	0,28	380,85	284,94
m15_t_07	0,55	120,00	30,01	14,82	12,30	15,65	16,20	30,0	29,5	22,67	10,07	12,60	0,10	0,14	240,37	226,37
m15_t_08	0,81	120,00	30,01	14,92	12,41	15,73	16,54	30,0	28,9	25,59	9,71	15,88	0,10	0,17	274,99	242,13
m15_t_09	1,04	120,00	30,01	14,92	12,48	15,58	16,62	30,7	29,5	29,35	9,82	19,53	0,10	0,21	310,31	257,21
m15_t_10	1,82	120,00	30,01	14,92	12,38	14,65	16,47	32,3	28,1	33,31	8,39	24,92	0,09	0,25	339,19	268,91
m15_t_11	1,56	120,00	30,01	14,92	12,89	15,65	17,21	30,9	27,9	30,86	8,93	21,93	0,10	0,22	325,31	263,35
m15_t_13	0,26	120,00	30,01	14,92	12,63	15,37	15,63	32,3	32,2	18,37	11,31	7,06	0,11	0,08	181,79	196,86
m15_t_14	0,55	120,00	30,01	15,00	12,39	15,81	16,35	30,3	29,8	20,47	9,95	10,52	0,10	0,12	221,52	217,31

Tab. 28 Shrnutí měření lomové houževnatosti pro materiál m14, 20°C

Vzorek	a_0 mm	a_f mm	B mm	B_n mm	W mm	J_{IC} kN/m	K_{IC} MPa·m ^{1/2}	J_{IC} průměr kN/m	K_{IC} průměr MPa·m ^{1/2}
m14_SE(B)_1	16,53	-----	15,00	13,35	30,00	47,6	105,4	42,1	98,9
m14_SE(B)_2	17,09	-----	15,00	13,57	30,00	43,5	100,8		
m14_SE(B)_3	15,63	-----	15,00	13,19	30,00	33,5	88,5		
m14_SE(B)_4	16,40	-----	15,00	11,74	30,00	43,6	100,8		

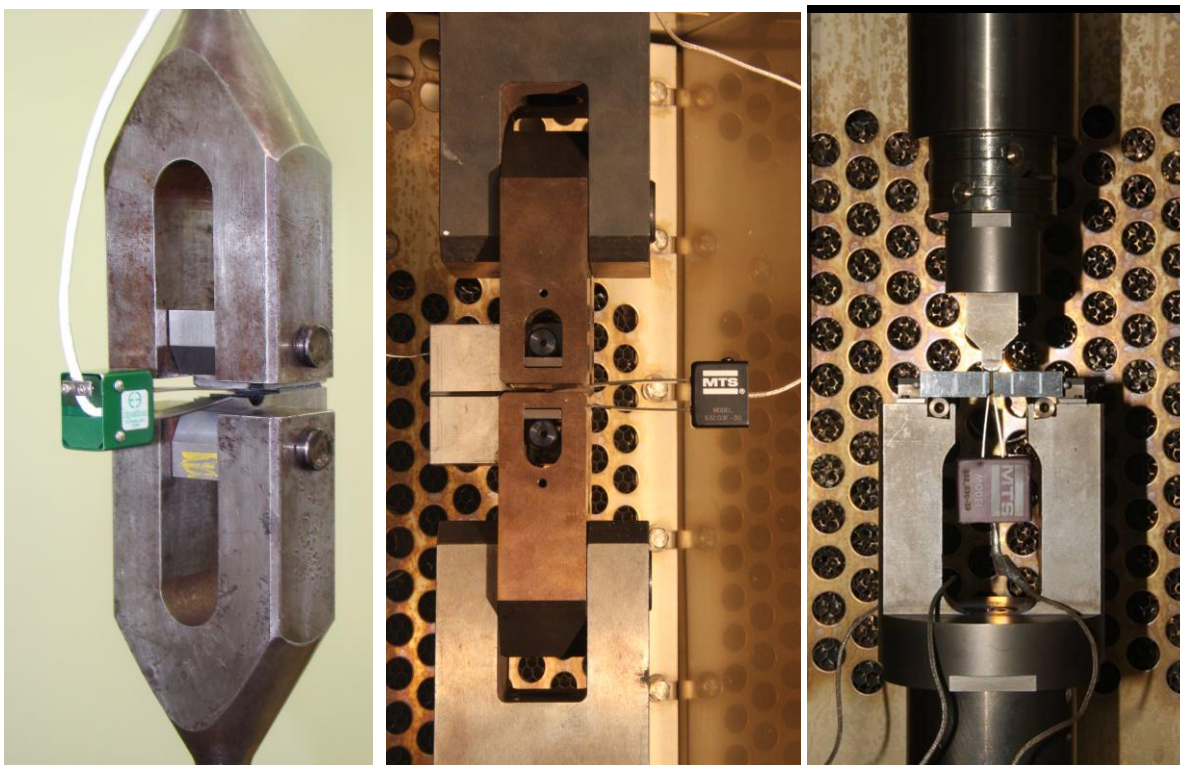
6.4.3. Provedení zkoušek metodou měření jednoho tělesa

Zkoušky metodou UC (unloading compliance) byly provedeny pro materiály m17, m18 a m19. Pro zkoušku lomové houževnatosti byla pro materiály m17 a m18 použita standardní 1T-CT tělesa (tělesa typu Central Tension o tloušťce 25mm, viz **Obr. 76**). V případě materiálu m19 byla použita jak 1T-CT tělesa, tak tělesa typu Charpy pro tří bodový ohyb, viz **Obr. 93**. Vyhodnocení bylo provedeno dle *ASTM E1820-09* [8]. Materiály m17 a m19 vykazovaly při 20°C plně houževnaté chování a pro vyhodnocení byl použit koncept J-R křivky. Materiál m18 se porušoval ve všech případech křehce a tudíž byla vyhodnocena jen hodnota K_{JIC} , resp. J_{IC} . Materiály m17 a m18 byly měřeny v laboratořích COMTES FHT a.s. (stejně jako ostatní materiály kromě m19). Materiál m19 byl měřen v laboratořích výzkumného centra HZDR

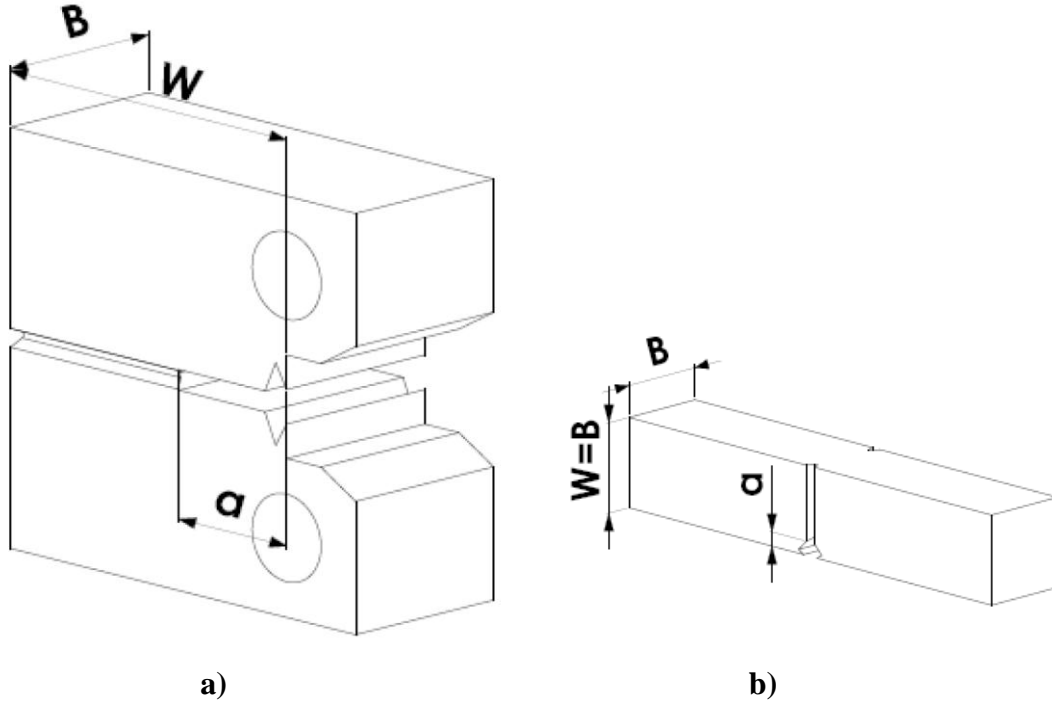
v německých Drážďanech, kde autor této práce absolvoval 3 měsíční odbornou stáž se zaměřením na vyhodnocení lomové houževnatosti měřené metodou UC.

Testy byly na obou pracovištích prováděny na servohydraulickém zkušebním stroji MTS 810 a deformace byla měřena COD extenzometrem. Měřící sestavy jsou na **Obr. 89**. J-R křivky byly stanoveny na základě metody UC, kdy délka trhliny byla v průběhu zkoušky počítána pomocí měření změny poddajnosti tělesa. Hodnoty J-integrálu byly vypočteny na základě vztahů (60) až (71). Příklad záznamu zkoušky je znázorněn na **Obr. 91**. J-R křivky naměřené pro jednotlivé materiály jsou znázorněny na **Obr. 93** a **Obr. 94**. Výsledky měření jsou shrnuty v **Tab. 29** až **Tab. 31**.

U oceli m19 byly použity dvě geometrie zkušebních těles – 1T-CT a Charpy SE(B), viz **Obr. 90**. Díky tomu bylo možno porovnat vliv velikosti zkušebních těles na naměřené J-R křivky. Výpočet délky trhliny pro vzorek Charpy SE(B) byl doplněn o korekci publikovanou v práci [73]. Na **Obr. 94** je možno pozorovat, že se J-R křivka pro vzorek Charpy SE(B) začíná odklánět od J-R křivky pro CT vzorek při cca 0,5 mm stabilního nárůstu trhliny a pro větší nárůsty trhlin jsou sklony křivek pro obě geometrie zřetelně odlišné. Nicméně průsečík J_0 , považovaný za začátek stabilního šíření trhliny, je měřen ještě před tímto odklonem, a proto jsou měřené hodnoty LH pro obě geometrie velmi podobné, resp. hodnoty pro SE(B) se nacházejí mezi krajními hodnotami pro 1T-CT. Dle naměřených výsledků pro ocel m19 lze tedy usoudit, že ani přes značnou rozdílnost těles 1T-CT a Charpy SE(B) nemá velikostní faktor na hodnoty LH zásadní vliv.



Obr. 89 Měřící sestava pro zkoušky LH; vlevo: COMTES, těleso 1T-CT; uprostřed: HZDR Drážďany, těleso 1T-CT; vpravo: HZDR Drážďany, těleso S(E)B Charpy



Obr. 90 Tělesa použitá pro zkoušky lomové houževnatosti v HZDR (Drážďany)
 a) CT těleso; 1T-CT: B = 25.4 mm, W = 50.8 mm, a = 25 mm
 b) Charpy těleso SE(B); W=B=10 mm, a=5 mm

$$J_{(i)} = J_{el(i)} + J_{pl(i)} \quad (60)$$

$$J_{el(i)} = \frac{K_{(i)}^2 (1 - \nu^2)}{E} \quad (61)$$

$$K_{(i)(CT)} = \left[\frac{F_{(i)}}{(BB_N W)^{0,5}} \right] f \left(\frac{a_{(i)}}{W} \right) \quad (62)$$

$$K_{(i)(SE(B))} = \left[\frac{F_{(i)} \cdot S_p}{(BB_N)^{0,5} W^{1,5}} \right] f \left(\frac{a_{(i)}}{W} \right) \quad (63)$$

$$f_{(CT)} \left(\frac{a_{(i)}}{W} \right) = \frac{\left[\left(2 + \frac{a_{(i)}}{W} \right) \left(0,886 + 4,64 \left(\frac{a_{(i)}}{W} \right) - 13,32 \left(\frac{a_{(i)}}{W} \right)^2 + 14,72 \left(\frac{a_{(i)}}{W} \right)^3 - 5,6 \left(\frac{a_{(i)}}{W} \right)^4 \right) \right]}{\left(1 + \left(\frac{a_{(i)}}{W} \right) \right)^{1,5}} \quad (64)$$

$$J_{(CT)pl(i)} = J_{pl(i-1)} + \left[\frac{\eta_{(CT)(i-1)} \cdot \Delta A_{pl(i)}}{b_{(i-1)} \cdot B_N} \right] \bullet \left[1 - \gamma_{(i-1)} \frac{\Delta a_{(i)}}{b_{(i-1)}} \right] \quad (65)$$

$$\eta_{(CT)(i-1)} = 2 + 0,522 \frac{b_{(i-1)}}{W} \quad (66)$$

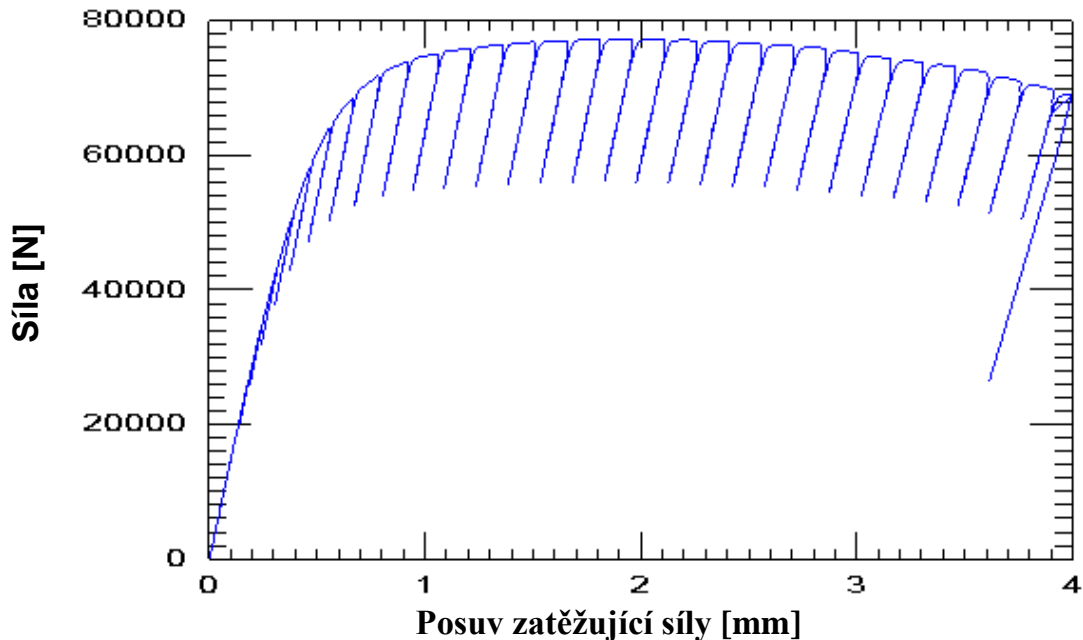
$$\gamma_{(CT)(i-1)} = 1 + 0,76 \frac{b_{(i-1)}}{W} \quad (67)$$

$$f_{(SE(B))} \left(\frac{a_{(i)}}{W} \right) = \frac{3 \left(\frac{a_{(i)}}{W} \right)^{0,5} \left[1,99 - \left(\frac{a_{(i)}}{W} \right) \left(1 - \left(\frac{a_{(i)}}{W} \right) \right) \bullet \left(2,15 - 3,93 \left(\frac{a_{(i)}}{W} \right) + 2,7 \left(\frac{a_{(i)}}{W} \right)^2 \right) \right]}{2 \left(1 + 2 \left(\frac{a_{(i)}}{W} \right) \right) \bullet \left(1 - \left(\frac{a_{(i)}}{W} \right) \right)^{1,5}} \quad (68)$$

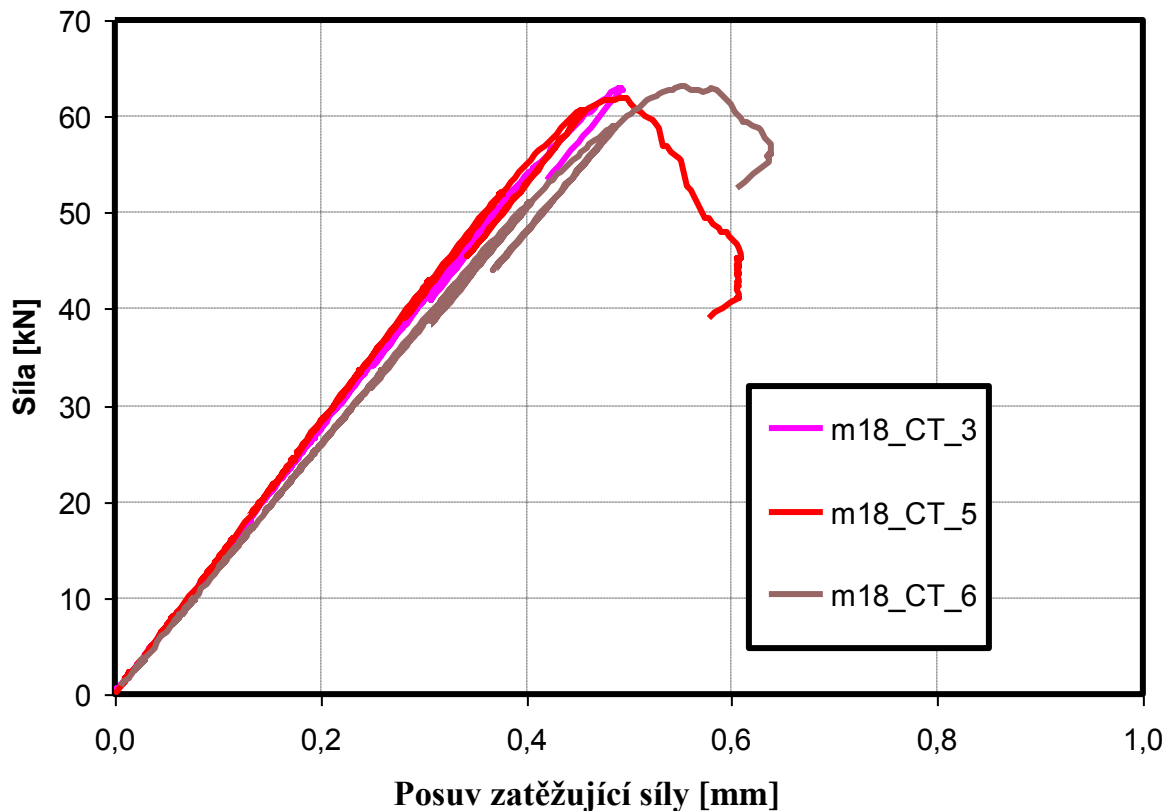
$$J_{(SE(B))pl(i)} = J_{pl(i-1)} + \left[\frac{\eta_{(SE(B))(i-1)} \cdot \Delta A_{pl(i)}}{b_{(i-1)} \cdot B_N} \right] \bullet \left[1 - \gamma_{(i-1)} \frac{\Delta a_{(i)}}{b_{(i-1)}} \right] \quad (69)$$

$$\eta_{(SE(B))(i-1)} = 1,9 \quad (70)$$

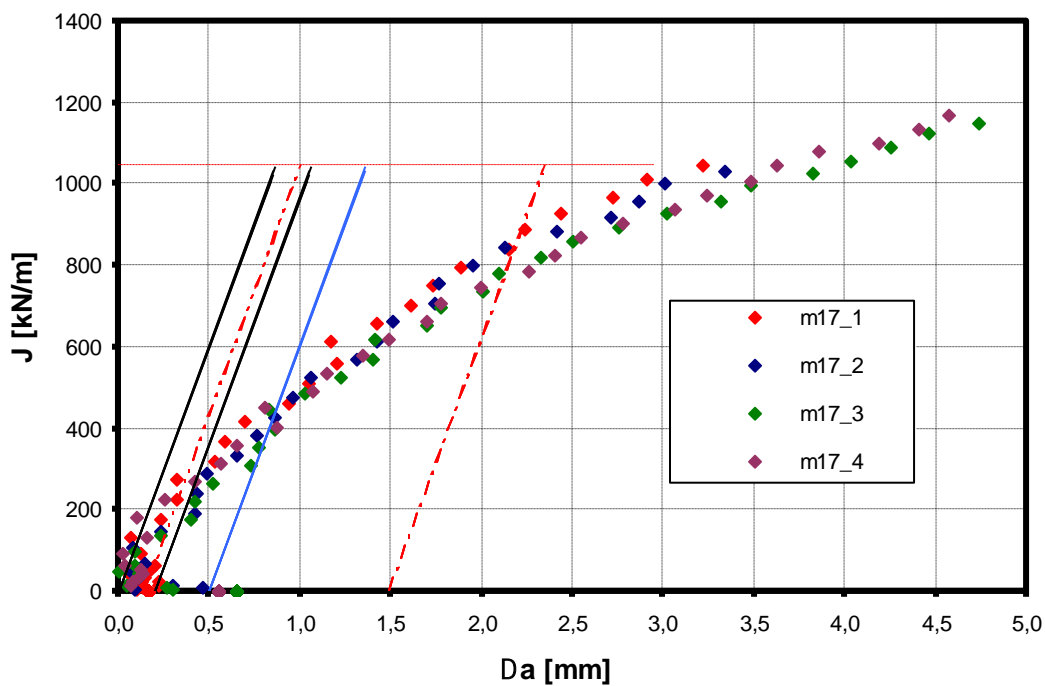
$$\gamma_{(SE(B))(i-1)} = 0,9 \quad (71)$$



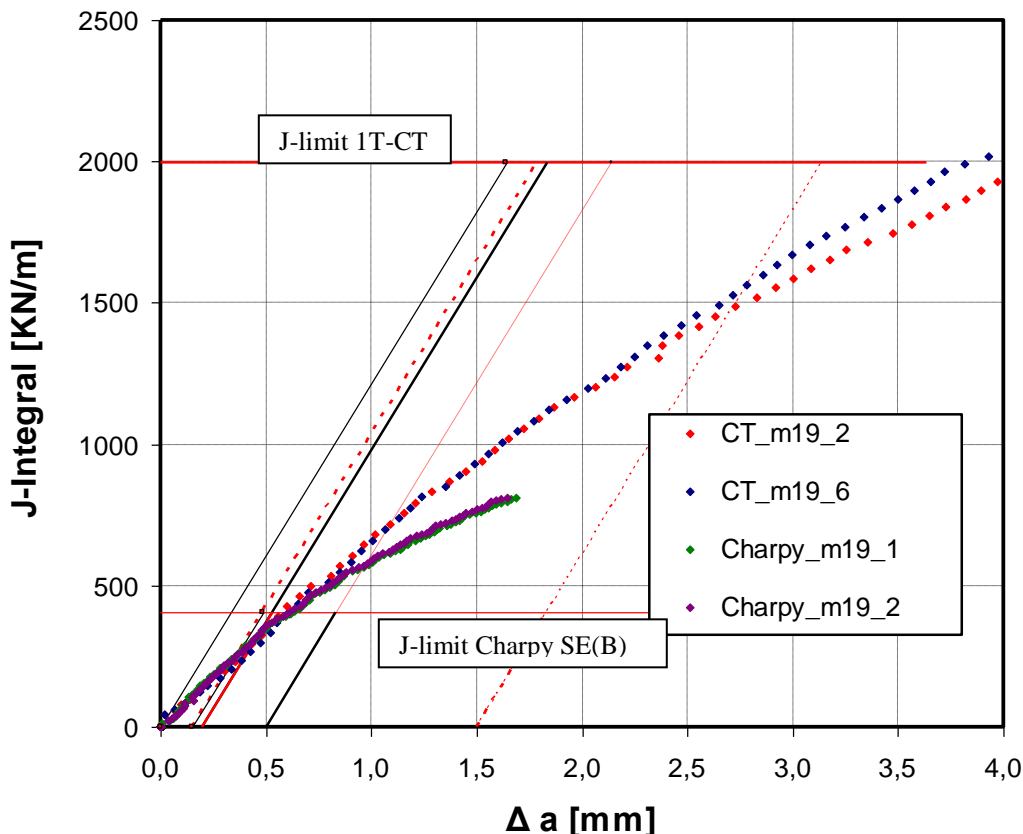
Obr. 91 Příklad záznamu měření zkoušek lomové houževnatosti, m17_1



Obr. 92 Záznamy měření zkoušek lomové houževnatosti, m18, 20°C



Obr. 93 J-R křivky, 20°C, materiál m17, tělesa 1T-CT



Obr. 94 J-R křivky, 20°C, materiál m19, tělesa 1T-CT a Charpy SE(B)

Tab. 29 Výsledky lomové houževnatosti, materiál m17, 20°C

Vzorek	a_0	a_f	B	B_n	W	J_{IC}	K_{IC}	J_{IC} průměr	K_{IC} průměr
	mm	mm							
m17_1	24,41	27,57	25,09	20,09	49,99	294,5	278,1	263,0	262,4
m17_2	25,05	28,26	25,04	20,08	50,04	246,5	254,4		
m17_3	25,25	29,87	25,04	20,30	49,94	224,3	242,7		
m17_4	25,09	29,96	25,00	20,25	50,04	286,5	274,3		

Tab. 30 Výsledky lomové houževnatosti, materiál m18, 20°C

Vzorek	a_0	a_f	B	B_n	W	J_{IC}	K_{IC}	J_{IC} průměr	K_{IC} průměr
	mm	mm							
m18_CT_3	24,82	-----	24,96	20,08	50,02	71,4	128,2	74,7	131,1
m18_CT_5	24,59	-----	25,06	19,92	49,99	74,7	131,1		
m18_CT_6	25,52	-----	25,00	25,00	50,00	77,9	133,9		

Tab. 31 Výsledky lomové houževnatosti, materiál m19, 20°C

Vzorek	a_0	a_f	B	B_n	W	J_{IC}	K_{IC}	J_{IC} průměr	K_{IC} průměr
	mm	mm							
CT_m19_2	26,56	30,70	25,43	20,41	50,85	334,1	282,5	318,7	275,8
CT_m19_6	26,45	30,75	25,38	20,40	50,81	288,9	262,7		
Charpy_m19_1	4,99	6,67	9,97	8,01	10,01	324,1	278,2		
Charpy_m19_2	5,03	6,65	9,97	8,00	9,99	327,8	279,8		

6.4.4. Shrnutí výsledků lomové houževnatosti vyhodnocené dle normy ASTM E 1820

Použitá norma má zásadní vliv na hodnoty lomové houževnatosti, jak bude ukázáno v kapitole 6.4.5. Proto je nezbytné při porovnávání výsledků pro různé materiály mít jistotu, podle které normy byly testy provedeny a vyhodnoceny. V **Tab. 32** jsou shrnuty výsledky zkoušek lomové houževnatosti provedené a vyhodnocené dle *ASTM E1820-09* [8] při 20°C. Tyto hodnoty budou dále sloužit jako referenční hodnoty pro určení korelačních vztahů z miniaturních těles (SPT).

Tab. 32 Výsledky lomové houževnatosti pro všechny měřené materiály

Materiál	Metoda	Šíření trhliny	Vzorek	J_{Ic}/J_Q	K_{Ic}/K_Q
				kN/m	MPa.m ^{1/2}
m11	MS	Tvárné	SE(B) 10x20 mm	253,5	239,5
m12	MS	Tvárné	SE(B) 10x20 mm	382,6	290,0
m14	-----	Křehké	SE(B) 15x30 mm	42,1	98,9
m15	MS	Tvárné	SE(B) 15x30 mm	189,9	209,3
m17	UC	Tvárné	1T-CT	263,0	262,4
m18	-----	Křehké	1T-CT	74,7	131,1
m19	UC	Tvárné	1T-CT	318,7	275,8

6.4.5. Vyhodnocení lomové houževnatosti materiálu m19 dle normy ISO 12135

Autor této práce se během své stáže v HZDR podílel nejen na testování oceli P91 (zde označenou m19) ale také na vývoji vyhodnocovacího softwaru dle americké normy *ASTM E1820-09* [8] a evropské normy *ISO 12135* [9]. (Celý rozsah práce je uvedený v [74].)

Obě normy jsou používány pro vyhodnocení lomové houževnatosti v houževnaté oblasti porušování materiálu. Začátek šíření trhliny nemůže být definován jako bod na $J-\Delta a$ křivce, ale spíše jako proces postupného šíření trhliny. Parametry J_{Ic} a $J_{0.2BL}$ vyjadřují inženýrsky určenou lomovou houževnatost definovanou jako průsečík rovnoběžky konstrukční čáry posunutý o 0,2mm a $J-R$ křivky. Tyto průsečíky jsou považovány za body v těsné blízkosti začátku šíření houževnaté trhliny. (pozn.: Při měření lomové houževnatosti nejprve dostáváme provizorní hodnoty J_Q nebo $J_{0.2BL(B)}$, které se stávají nezávislými parametry lomové houževnatosti J_{Ic} a $J_{0.2BL}$ až po splnění kritérií stanovených v příslušné normě).

Přestože jsou obě normy navrženy za účelem získání jednoho parametru, resp. jedné hodnoty lomové houževnatosti, liší se navzájem zejména v následujících bodech:

1. Čára otupení (resp. konstrukční čára) je dle *ASTM E1820* počítána jako $J = 2 \cdot \sigma_Y \cdot \Delta a$ zatímco dle normy *ISO 12135* je počítána jako $J = 3.75 \cdot R_m \cdot \Delta a$, což způsobuje mnohem strmější sklon a získané hodnoty $J_{0.2BL}$ jsou významně nižší než J_{Ic}
2. Postup výpočtu hodnot J -Integrálu jsou nepatrně odlišné pro oba zmiňované standardy (detaily jsou uvedené v literatuře [8] a [9])
3. Rovnice, pomocí které se prokládají body $J-R$ křivky jsou v případě normy *ISO 12135* $J = \alpha + \beta(\Delta a)^\gamma$ (α , β , γ . jsou experimentálně zjištěné koeficienty), zatímco v normě *ASTM E1820* je uvedena rovnice $J = C_1((\Delta a/k))^{C_2}$ (C_1 a C_2 jsou experimentálně zjištěné koeficienty a $k=1$ mm).
4. *ASTM E1820* kompenzuje nejistoty a nepřesnosti v měření prvotních bodů $J-\Delta a$ křivky pomocí procedury určující hodnotu a_{0q} . Tato hodnota se určí řešením maticové rovnice (72). Norma *ISO 12135* pro tyto účely používá koeficient λ .
5. Rozdílné jsou také kapacity měření závislé na rozměrech tělesa (J_{max} a J_{limit}).

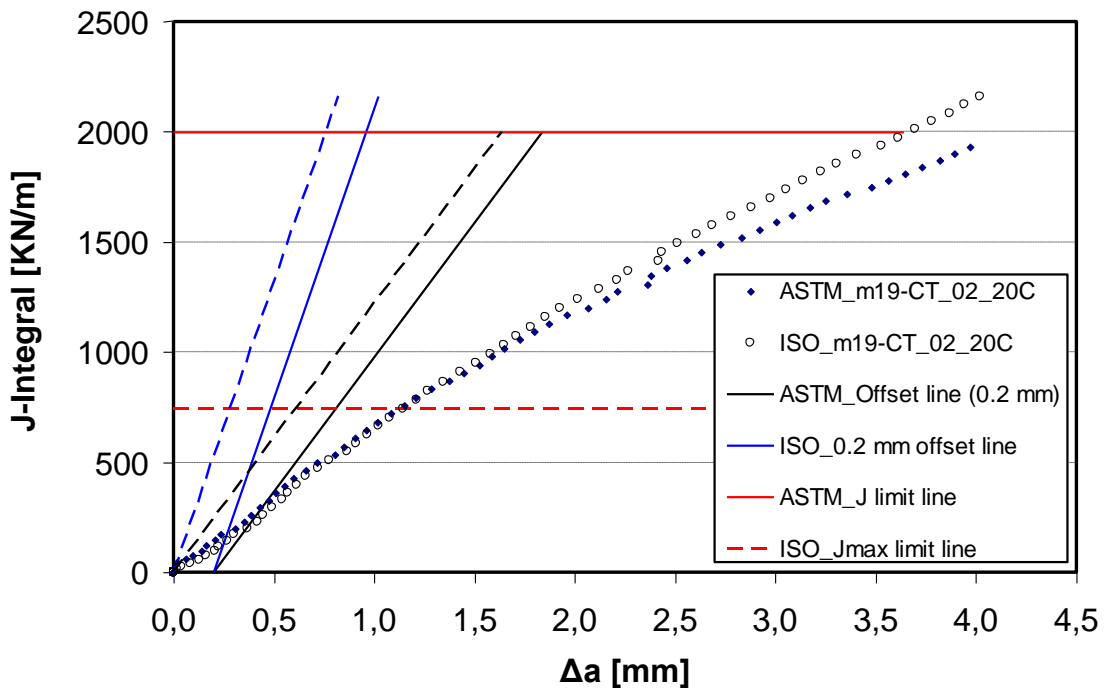
$$\left\{ \begin{array}{l} \Sigma a_i - \frac{\Sigma J_i}{2\sigma_Y} \\ \Sigma a_i J_i^2 - \frac{\Sigma J_i^3}{2\sigma_Y} \\ \Sigma a_i J_i^3 - \frac{\Sigma J_i^4}{2\sigma_Y} \end{array} \right\} = \left[\begin{array}{l} n \Sigma J_i^2 \Sigma J_i^3 \\ \Sigma J_i^2 \Sigma J_i^4 \Sigma J_i^5 \\ \Sigma J_i^3 \Sigma J_i^5 \Sigma J_i^6 \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{l} a_{0q} \\ B \\ C \end{array} \right\} \quad (72)$$

Výsledky lomové houževnatosti se budou tedy pro daný vzorek diametrálně lišit v závislosti na použité normě. Vyhodnocené hodnoty lomové houževnatosti pro obě zmiňované normy shrnuje **Tab. 33**. Příklady porovnání J-R křivek vyhodnocených dle obou standardů jsou na **Obr. 95** a **Obr. 96**. Z těchto obrázků je také zřejmý rozdíl ve sklonu tzv. „offset line“ (čára rovnoběžná s konstrukční čarou posunutá o 0,2mm), který se v největší míře podílí na rozdílných výsledcích lomové houževnatosti.

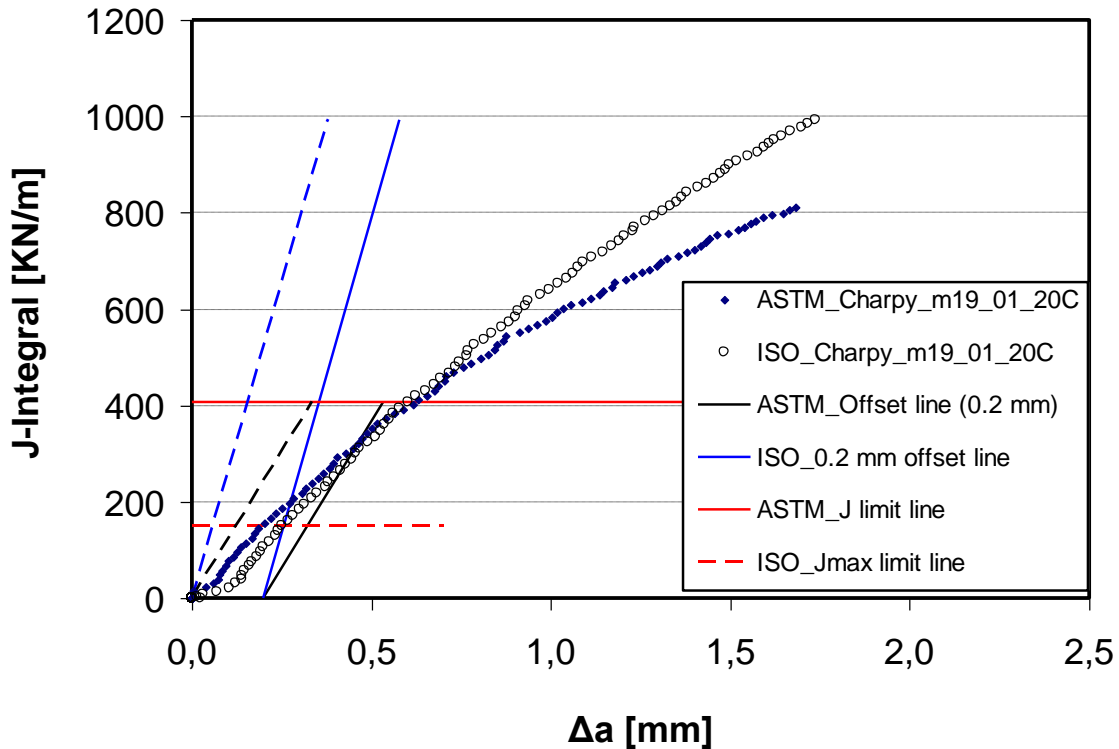
Průměrná hodnota $J_{0,2BL}$ je méně než poloviční ve srovnání s hodnotou J_{IC} . Při dalších korelacích s miniaturními tělesy nebudou hodnoty $J_{0,2BL}$ již dále využívány. Při určování korelací mezi SPT a LH je však třeba dát velký pozor, podle jaké normy je LH zkoušena, neboť získané koeficienty korelačních vztahů by pravděpodobně byly zcela jiné než při použití normy ASTM E1820.

Tab. 33 Porovnání výsledků LH pro m19 při 20°C dle norem ASTM E1820 [8] a ISO 12135 [9]

Vzorek	Rozměry vzorku/trhliny					Vyhodnocení ASTM		Vyhodnocení ISO	
	a_0 mm	a_f mm	B mm	B_n mm	W mm	J_{IC} kN/m	K_{JIC} MPa.m ^{1/2}	$J_{0,2BL}$ in N/mm	$K_{J0,2BL}$ MPa√m
CT_m19_2	26,56	30,70	25,43	20,41	50,85	334,1	282,5	113,9	165,0
CT_m19_6	26,45	30,75	25,38	20,40	50,81	288,9	262,7	75,6	134,4
Charpy_m19_1	4,99	6,67	9,97	8,01	10,01	324,1	278,2	168,5	200,6
Charpy_m19_2	5,03	6,65	9,97	8,00	9,99	327,8	279,8	170,9	202,0
průměr						318,7	275,8	132,2	175,5



Obr. 95 Porovnání J-R křivek v závislosti na použité normě pro vzorek m19-CT_02, 20°C



Obr. 96 Porovnání J-R křivek v závislosti na použité normě pro vzorek m19-Charpy_02, 20°C

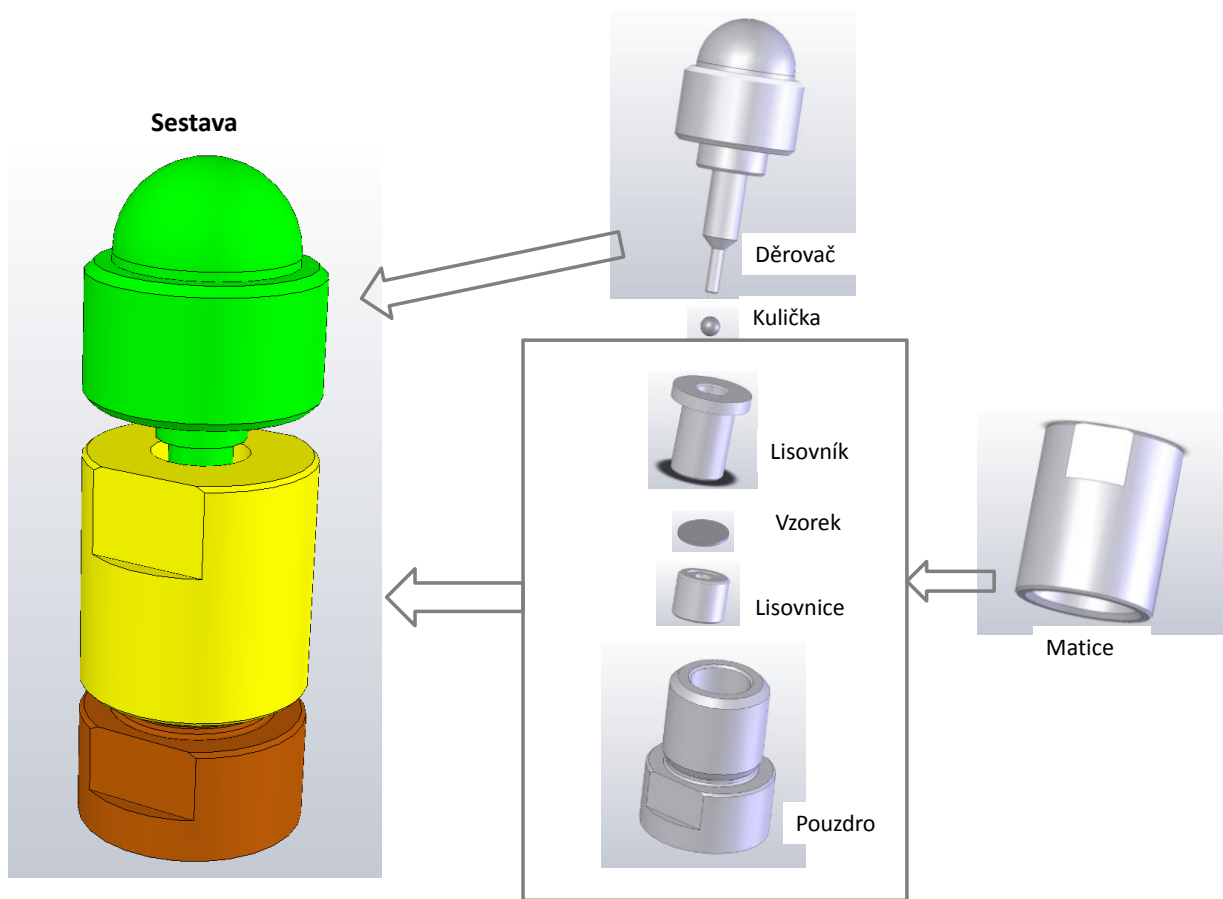
6.5. Zkoušky Small Punch Test (SPT)

Princip a způsob vyhodnocení této stále poměrně nové zkoušky byl popsán v kapitole 5.2.3 a 5.2.4. Všechny zkoušky byly provedeny v mechanické laboratoři COMTES FHT a.s..

Provedení zkoušek a použitý přípravek s rozměry uvedenými na Obr. 35 bylo ve shodě s předpisem CWA 15627 [10]. Pro penetraci zkušebního disku byla použita kalená kulička o průměru 2,5 mm. Rychlost pístu při zatěžování byla pro všechny testy nastavena na 0,5 mm/min.

Velká pozornost byla věnována samotné přípravě zkušebních těles ve tvaru disků o průměru 8 mm a tloušťce 0,5 mm. Geometrie disku s maximálními povolenými odchylkami je uvedena na Obr. 37. Vzorky byly odebrány v podélném směru (stejně jako u zkoušek tahem), tj. osa tělesa byla shodná se směrem válcování. Zkušební tělesa byla vyrobena z tyče o průměru 8 mm a následně z ní byly nařezány disky o tloušťce cca 0,55 mm. Takto vyrobené disky byly dále broušeny na metalografické brusce s dokončovacím brusným papírem P1200. Konečná tloušťka byla v toleranci $\pm 1\% h_0$. Tolerance rozměrů tloušťky byly měřeny ve čtyřech místech po obvodu po 90° a ve středu vzorečku. Průměr vzorečku byl měřen ve dvou pozicích po 90°.

Vyrobený disk se vloží do rozšroubovaného přípravku, který se následně smontuje. Způsob skládání přípravku a názvy jednotlivých částí jsou zřejmé z Obr. 97. Aby byla zajištěna shodná přítlačná síla pro všechny zkoušky, byl přípravek dotahován momentovou silou 30 Nm pomocí momentového klíče. Small Punch Testy byly provedeny na servohydraulickém zkušebním stroji s kapacitou 10kN. Uspořádání zkoušky je znázorněno na Obr. 98. Během zkoušky byla zaznamenávána síla a posuv zatěžující síly měřený extenzometrem. Naměřené záznamy byly dále vyhodnoceny dle CWA 15627 a tyto výsledky byly použity pro nalezení korelačních vztahů mezi SPT a standardními testy zmíněnými v předchozích kapitolách.



Obr. 97 Přípravek pro zkoušky SPT



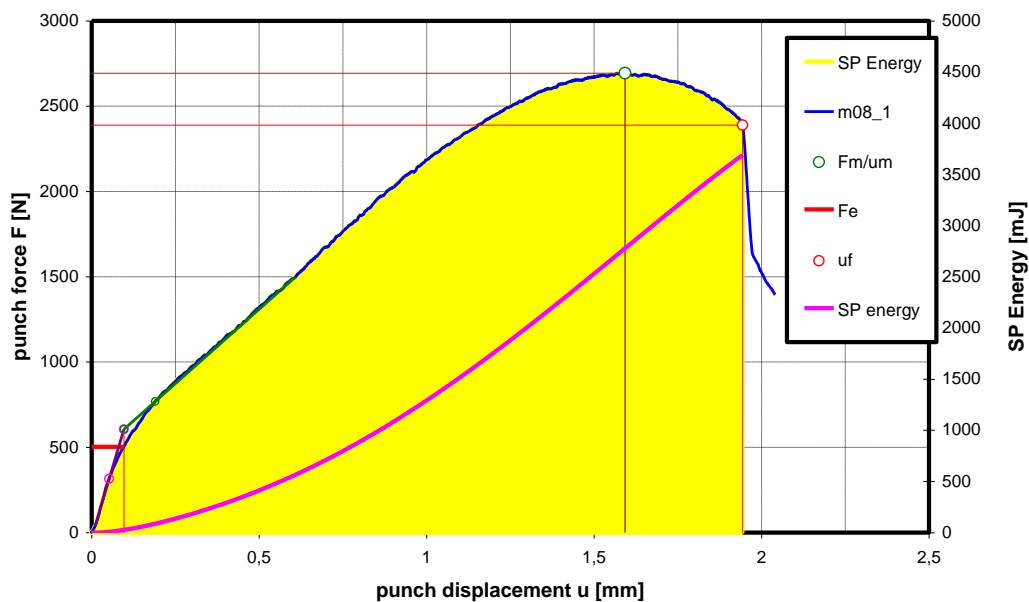
Obr. 98 Schéma uspořádání SPT; vlevo: Testovací stroj, vpravo: detail zkoušky

6.5.1. Vývoj softwaru pro vyhodnocení SPT

V době, kdy se v laboratořích firmy COMTES FHT a.s. začaly provádět první zkoušky SPT, nebyl k dispozici žádný softwarový nástroj pro vyhodnocení těchto zkoušek. Proto bylo nutné vyvinut vyhodnocovací software umožňující vyhodnotit charakteristiky dle dokumentu CWA 15627 [10]. Pro vytvoření takového nástroje byl pro svou jednoduchost a variabilitu zvolen program Excel 2003, ve kterém se vytvořila šablona umožňující požadované vyhodnocení. Po zkoušce se do této šablony nahrají zaznamenaná data ze zkušebního stroje (t.j. průběhy zaznamenané ze siloměru a extenzometru), se kterými je dále pracováno. Automaticky se vykreslí záznam v souřadnicích síla-deformace. Dále se zde nastaví přímkou procházející počáteční lineární částí záznamu zkoušky. Software umožňuje posunout celý graf tak, aby tato přímkou procházela počátkem grafu. Na **Obr. 99** je příklad záznamu SPT s následujícími vyhodnocenými charakteristikami: F_m [N], F_e [N], u_m [mm], u_f [mm] a E^{SP} [J]

Charakteristiky F_m a u_m jsou vyhodnoceny automaticky jako maximální síla dosažená během testu, resp. deformace při maximální síle. Síla F_e je vyhodnocena jako průsečík dvou tečen (viz kapitola 5.2.4.1), ze kterého je vedena kolmice k ose u. Průsečík této kolmice s naměřeným záznamem je vyhodnocen jako síla F_e . Tečny je možno ručně nastavit tak, aby jejich pozice co nejlépe odpovídala požadavkům na vyhodnocení F_e dle CWA 15627.

Na tomto místě je třeba upozornit, že existují i jiné metody vyhodnocení síly F_e , které mohou způsobit rozdíl vyhodnocených hodnot v řádu několik desítek N (více v kapitole 5.2.4.1). Ne zcela jednoznačné je vyhodnocení u_f . Předpis CWA 15627 doporučuje tento bod vyhodnotit při poklesu maximální síly o 20%. V mnoha reálných zkouškách by však toto vyhodnocení neodpovídalo realitě, zejména u kalených a nízkopopuštěných ocelí s vysokou pevností a nízkou lomovou houževnatostí. Jak bude ukázáno dále, k porušení disku může dojít mnohem dříve, než síla poklesne na 80% svého maxima (viz **Obr. 103**). Proto je bod u_f vyhodnocen vždy ručně (většinou jako prudký pokles síly) a k tomuto bodu je také počítána SP energie. Vzhledem k dosud ne zcela jednoznačnému českému názvosloví byl ponechán popis os v angličtině dle CWA 15627 [10].

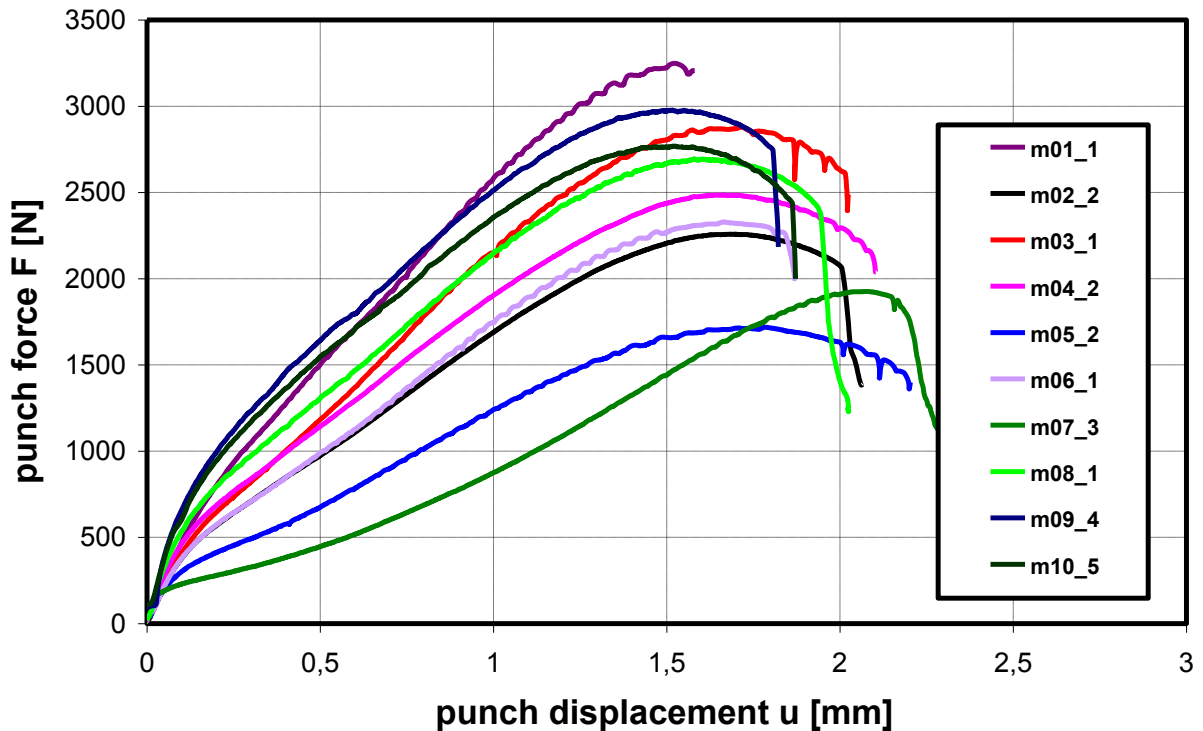


Obr. 99 Ukázka vyhodnocení záznamu SPT na zkušebním disku m08_1

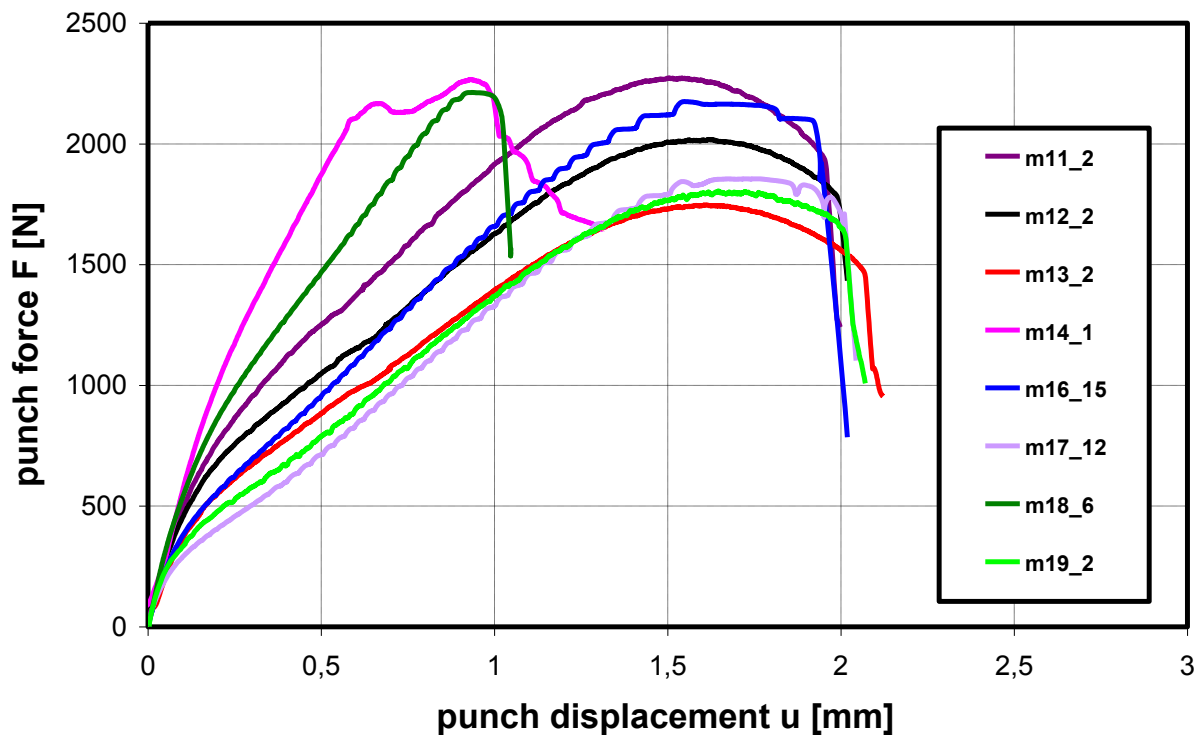
6.5.2. Výsledky zkoušek SPT při pokojové teplotě

Pro všechny zkoumané materiály m01 - m19 byly naměřeny SPT. Pro materiály m01 – 07, které sloužily jen pro porovnání se zkouškou tahem, byly provedeny 2 až 3 testy pro každý materiál, u ostatních materiálů bylo provedeno nejméně 5 testů pro každý materiál. Záznamy byly vyhodnoceny pomocí výše popsaného softwaru a výsledky zkoušek jsou uvedeny v **Tab. 34 - Tab. 41**. Reprezentativní záznamy SPT pro všechny zkoumané materiály jsou znázorněny na **Obr. 100** a **Obr. 101**.

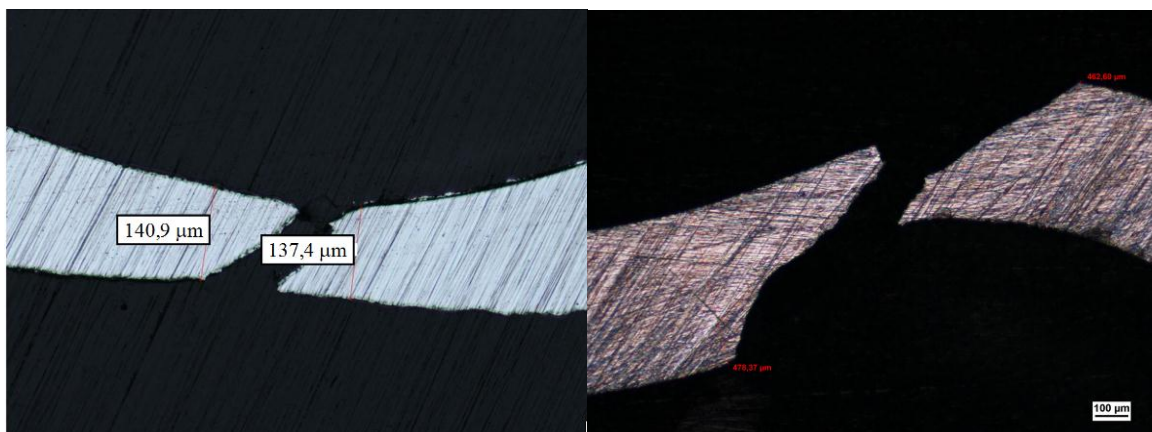
Dále bylo, pro materiály m08 – m19, měřeno předpokládané nejužší místo po zkoušce dle postupu uvedeného v kapitole 5.2.4.3. Měření bylo provedeno na světelném mikroskopu Nikon Epiphot 200. Příklad měření nejužšího místa po zkoušce pro vzorek m12_5 a m14_7 je znázorněn na **Obr. 102**. Ve většině případů bylo místo porušení u_f určeno jako bod na grafu při prudkém poklesu síly. Výjimku tvoří materiál m14, u kterého byly pozorovány náhlé silové poskoky. Na **Obr. 103** jsou vyznačeny 2 oblasti, ve kterých byly testy u tohoto materiálu přerušeny a byly pozorovány trhliny pomocí SEM. Z **Obr. 103 - Obr. 105** je patrné, že trhlina je pozorována již v oblasti **I** a k tomuto místu byla vyhodnocena jak SP energie E^{SP} , tak deformace odpovídající porušení disku u_f .



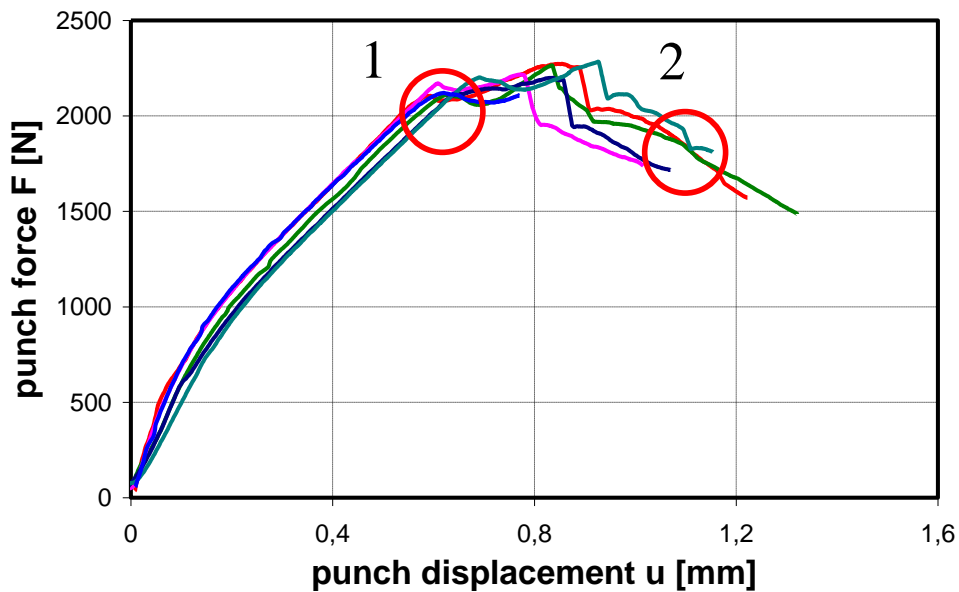
Obr. 100 Reprezentativní záznamy SPT pro materiály m01 – m10



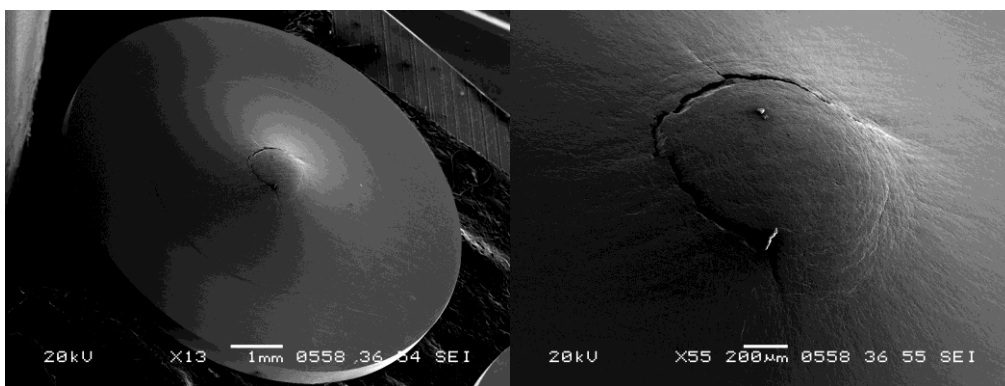
Obr. 101 Reprezentativní záznamy SPT pro materiály m11 – m19



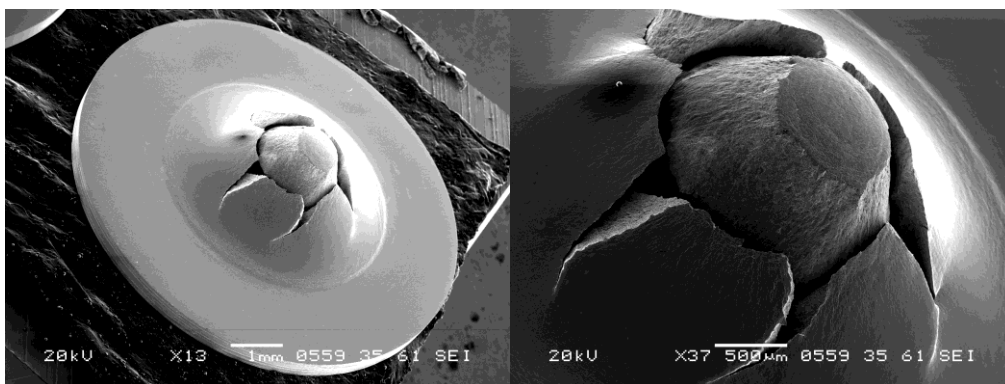
Obr. 102 Příklad měření neuzšího místa po zkoušce, vzorek m12_5 (vlevo) a m14_7 (vpravo)



Obr. 103 SPT záznamy pro materiál m14 s vyznačenými oblastmi porušení 1 a 2



Obr. 104 Porušení disku pro oblast 1 – první pokles síly



Obr. 105 Porušení disku pro oblast 2 – v blízkosti konce záznamů

Tab. 34 Výsledky SPT pro materiály m01 – m07 (bez měření h_f)

Materiál	F_m N	F_e N	u_m mm	u_f mm	E^{SP} mJ
m01_1	3248,5	628,2	1,52	1,58	3199
m01_2	3312,6	637,6	1,48	1,58	3266
Průměr	3280,6	632,9	1,50	1,58	3233
m02_1	2219,0	306,0	1,70	2,00	3023
m02_2	2258,3	386,4	1,68	2,06	3171
Průměr	2238,7	346,2	1,69	2,03	3097
m03_1	2877,5	443,1	1,71	2,02	3922
m03_2	2892,0	456,4	1,64	1,90	3718
Průměr	2884,8	449,7	1,68	1,96	3820
m04_1	2270,2	344,5	1,53	1,86	2923
m04_2	2485,3	442,6	1,66	2,10	3670
Průměr	2377,8	393,6	1,59	1,98	3296
m05_1	1726,9	239,8	1,69	2,18	2596
m05_2	1718,9	238,1	1,78	2,20	2588
Průměr	1722,9	239,0	1,74	2,19	2592
m06_1	2328,4	377,1	1,66	1,87	2857
m06_2	2248,5	334,5	1,70	1,85	2577
m06_3	2350,4	389,0	1,66	1,91	2943
Průměr	2309,1	366,9	1,67	1,87	2792
m07_1	1910,7	203,7	2,06	2,24	2361
m07_2	1937,6	183,3	2,11	2,30	2467
m07_3	1925,3	164,5	2,07	2,32	2439
Průměr	1924,5	183,8	2,08	2,29	2422

Tab. 35 Výsledky SPT pro materiály m08 – m13 (včetně měření h_f)

Materiál	F_m N	F_e N	u_m mm	u_f mm	E^{SP} mJ	h_f mm
m08_1	2694,9	534,5	1,58	1,94	3662	0,144
m08_2	2752,2	516,5	1,61	1,89	3642	0,144
m08_3	2752,5	567,1	1,65	1,93	3710	0,000
m08_4	2693,3	502,6	1,59	1,94	3690	0,146
m08_5	2697,0	513,9	1,55	1,80	3367	0,173
m08_6	2711,7	470,1	1,61	1,88	3588	0,157
Průměr	2716,9	517,4	1,60	1,90	3610	0,127
m09_1	2928,0	663,9	1,61	1,88	3912	0,206
m09_2	2890,8	642,4	1,58	1,80	3698	0,191
m09_3	2948,5	657,7	1,60	1,84	3836	0,199
m09_4	2977,8	646,3	1,52	1,80	3853	0,184
m09_5	2942,2	662,6	1,60	1,93	4082	0,176
Průměr	2937,4	654,6	1,58	1,85	3876	0,191
m10_1	2736,4	704,9	1,63	1,99	3960	0,171
m10_2	2694,9	659,2	1,56	1,92	3741	0,163
m10_3	2786,9	681,2	1,67	1,98	3979	0,161
m10_4	2674,1	706,8	1,62	1,96	3811	0,163
m10_5	2768,8	639,7	1,52	1,86	3755	0,176
Průměr	2732,2	678,4	1,60	1,94	3849	0,167
m11_1	2269,8	445,1	1,58	1,99	3262	0,161
m11_2	2274,1	543,9	1,50	1,95	3248	0,146
m11_3	2233,1	459,1	1,57	2,04	3335	0,139
m11_4	2320,6	562,6	1,67	2,07	3476	0,182
m11_5	2314,0	560,2	1,60	2,00	3376	0,164
m11_6	2239,2	526,8	1,61	1,99	3235	0,171
Průměr	2275,1	516,3	1,59	2,01	3322	0,161
m12_1	2002,5	474,3	1,65	2,08	3009	0,148
m12_2	2018,8	513,0	1,62	1,99	2902	0,158
m12_3	1982,2	528,4	1,68	2,12	3006	0,147
m12_4	2014,1	491,5	1,64	2,06	3003	0,148
m12_5	1980,3	519,3	1,67	2,09	2992	0,137
Průměr	1999,6	505,3	1,65	2,07	2982	0,148
m13_1	1788,5	479,6	1,64	2,16	2743	0,141
m13_2	1747,6	400,5	1,61	2,07	2599	0,125
m13_3	1754,2	487,0	1,71	2,18	2698	0,147
m13_4	1791,5	430,6	1,70	2,13	2699	0,146
m13_5	1734,1	413,8	1,69	2,14	2652	0,119
Průměr	1763,2	442,3	1,67	2,14	2678	0,136

Tab. 36 Výsledky SPT pro materiál m14 (včetně měření h_f)

Materiál	F_m N	F_e N	u_m mm	u_f mm	E^{SP} mJ	h_f mm
m14_1	2264,9	702,3	0,84	0,64	828	0,439
m14_2	2216,8	699,3	0,77	0,61	814	0,441
m14_3	2233,3	703,7	0,79	0,64	794	0,441
m14_4	2199,3	701,4	0,84	0,72	970	0,423
m14_5	2284,5	703,8	0,93	0,70	915	0,437
m14_6	2287,2	706,0	0,90	0,61	823	0,439
m14_7	2208,3	722,4	0,76	0,57	779	0,462
m14_8	2212,0	703,9	0,91	0,64	863	0,429
m14_9	2258,2	691,1	0,82	0,62	841	0,435
Průměr	2240,5	703,8	0,84	0,64	847	0,438

Tab. 37 Výsledky SPT pro materiál m15 (včetně měření h_f)

Materiál	F_m N	F_e N	u_m mm	u_f mm	E^{SP} mJ	h_f mm
m15_1	2515,1	438,4	1,62	1,80	3019	0,210
m15_2	2477,7	519,4	1,58	1,79	3068	0,195
m15_3	2439,8	522,4	1,53	1,76	2933	0,209
m15_4	2397,8	494,8	1,54	1,63	2583	0,263
m15_5	2357,8	506,4	1,47	1,53	2327	0,243
m15_6	2486,3	534,6	1,56	1,63	2651	0,256
m15_7	2391,1	544,9	1,55	1,60	2495	0,260
m15_8	2422,1	553,1	1,65	1,86	3094	0,187
m15_9	2428,4	468,0	1,63	1,74	2791	0,244
m15_10	2453,1	412,9	1,55	1,78	2903	0,252
m15_11	2433,8	375,7	1,56	1,75	2934	0,232
m15_12	2453,2	409,6	1,61	1,88	3103	0,223
m15_13	2424,0	450,4	1,65	1,84	3049	0,244
m15_14	2439,3	479,3	1,59	1,76	2934	0,245
m15_15	2432,5	415,0	1,60	1,81	3041	0,212
m15_16	2428,2	421,7	1,63	1,84	3042	0,235
m15_17	2347,4	476,5	1,64	1,82	2971	0,193
m15_18	2457,2	414,3	1,68	1,86	3112	0,239
m15_19	2656,4	299,6	1,65	1,73	2945	0,257
m15_20	2401,3	398,1	1,58	1,70	2639	0,244
m15_21	2516,9	404,9	1,60	1,76	2924	0,218
Průměr	2445,7	454,3	1,59	1,76	2884	0,231

Tab. 38 Výsledky SPT pro materiál m16 (včetně měření h_f)

Materiál	F_m N	F_e N	u_m mm	u_f mm	E^{SP} mJ	h_f mm
m16_1	2281,9	315,3	1,72	1,95	2952	0,209
m16_2	2162,0	400,5	1,73	1,97	3027	0,168
m16_3	2184,1	414,7	1,69	2,03	3150	0,181
m16_4	2130,9	370,0	1,71	1,90	2686	0,228
m16_5	2184,1	517,6	1,61	2,02	3184	0,199
m16_6	2168,3	522,7	1,71	2,01	3139	0,183
m16_7	2192,8	532,3	1,73	2,00	3137	0,175
m16_8	2166,3	537,1	1,69	2,02	3153	0,192
m16_9	2281,9	315,3	1,72	1,95	2952	0,207
m16_10	2167,6	289,5	1,63	1,86	2661	0,215
m16_11	2100,5	206,9	1,52	1,97	2838	0,180
m16_12	2197,1	245,6	1,65	1,95	2904	0,198
m16_13	2191,4	399,0	1,68	1,93	2824	0,200
m16_14	2213,3	285,5	1,68	1,92	2819	0,235
m16_15	2175,5	306,7	1,55	2,02	2973	0,189
m16_16	2169,4	205,0	1,56	2,07	3089	0,181
Průměr	2185,4	366,5	1,66	1,97	2968	0,196

Tab. 39 Výsledky SPT pro materiál m17 (včetně měření h_f)

Materiál	F_m N	F_e N	u_m mm	u_f mm	E^{SP} mJ	h_f mm
m17_1	1713,8	319,3	1,66	2,09	2488	0,152
m17_2	1818,1	373,1	1,77	2,20	2797	0,155
m17_3	1853,2	377,2	1,65	2,15	2777	0,212
m17_4	1734,5	339,1	1,82	2,15	2573	0,131
m17_5	1894,8	336,6	1,78	2,07	2722	0,201
m17_6	1896,1	348,9	1,66	2,09	2774	0,172
m17_7	1894,6	383,7	1,79	2,06	2660	0,212
m17_8	1877,2	371,0	1,73	2,10	2706	0,217
m17_9	1829,0	231,5	1,62	2,02	2470	0,185
m17_10	1856,5	220,5	1,64	2,01	2431	0,209
m17_11	1787,8	147,3	1,68	2,04	2445	0,184
m17_12	1855,2	165,7	1,73	2,04	2511	0,178
m17_13	1872,4	150,5	1,64	2,11	2633	0,189
m17_14	1825,9	196,0	1,64	2,17	2651	0,158
Průměr	1836,4	282,9	1,70	2,09	2617	0,182

Tab. 40 Výsledky SPT pro materiál m18 (včetně měření h_f)

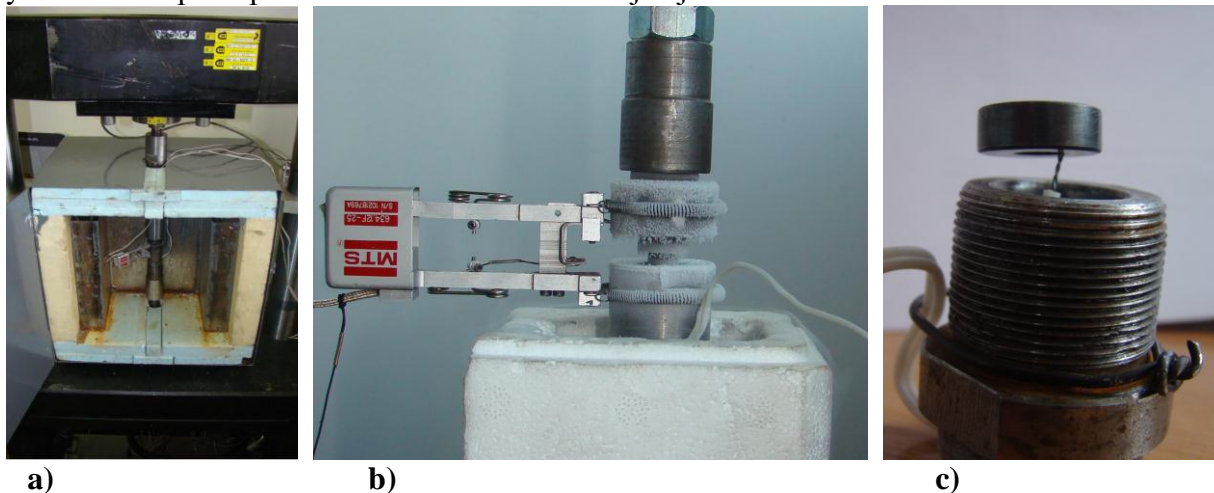
Materiál	F_m N	F_e N	u_m mm	u_f mm	E^{SP} mJ	h_f mm
m18_1	2159,7	670,8	0,91	0,94	1516	0,403
m18_2	2263,6	604,3	1,04	1,05	1688	0,370
m18_3	2291,1	483,2	0,96	0,99	1447	0,408
m18_4	2149,9	457,5	0,96	0,98	1342	0,400
m18_5	2184,9	454,0	0,97	0,99	1399	0,409
m18_6	2213,1	575,7	0,94	1,02	1466	0,410
m18_7	2234,4	359,3	0,98	1,00	1445	0,386
m18_8	2203,7	488,4	0,95	1,01	1456	0,379
m18_9	2216,6	641,7	0,97	1,04	1460	0,405
m18_10	2116,0	616,8	0,90	1,00	1399	0,394
m18_11	2192,8	513,1	0,95	1,02	1451	0,398
Průměr	2202,3	533,2	0,96	1,00	1461	0,397

Tab. 41 Výsledky SPT pro materiál m19 (včetně měření h_f)

Materiál	F_m N	F_e N	u_m mm	u_f mm	E^{sp} mJ	h_f mm
m19_1	1829,3	249,5	1,65	2,10	2642	0,148
m19_2	1805,6	263,0	1,65	2,07	2566	0,170
m19_3	1802,6	264,5	1,62	2,09	2615	0,152
Průměr	1812,5	259,0	1,64	2,09	2607	0,157

6.5.3. Měření a vyhodnocení přechodové teploty pomocí SPT

Zkoušky SPT pro určení přechodové teploty byly provedeny na ocelích m08 a m15. Měření bylo provedeno na servohydraulickém zkušebním stroji s kapacitou 10kN s přídatnou kryogenní komorou do -130°C (viz **Obr. 106 a**) a pro nižší teploty byl přípravek ponořen do kapalného dusíku (viz **Obr. 106 b**). Teplota chladicí lázně byla v tomto případě upravena poměrem dusíku a metylalkoholu tak, že při -196°C byl v lázni pouze čistý kapalný dusík. Teplota byla měřena navařeným termočlánkem typu K chromel-alumel (Cr-Al). Termočlánek nebyl přivařen přímo na zkušební disk z důvodu ovlivnění měření, ale byl přivařen na vnitřní straně lisovnice (viz **Obr. 106 c**). Z předcházejících měření bylo zjištěno, že po poměrně krátké době (do 5ti minut) byla měřená teplota přímo na zkušební disk stejná jako na vnitřní straně lisovnice.



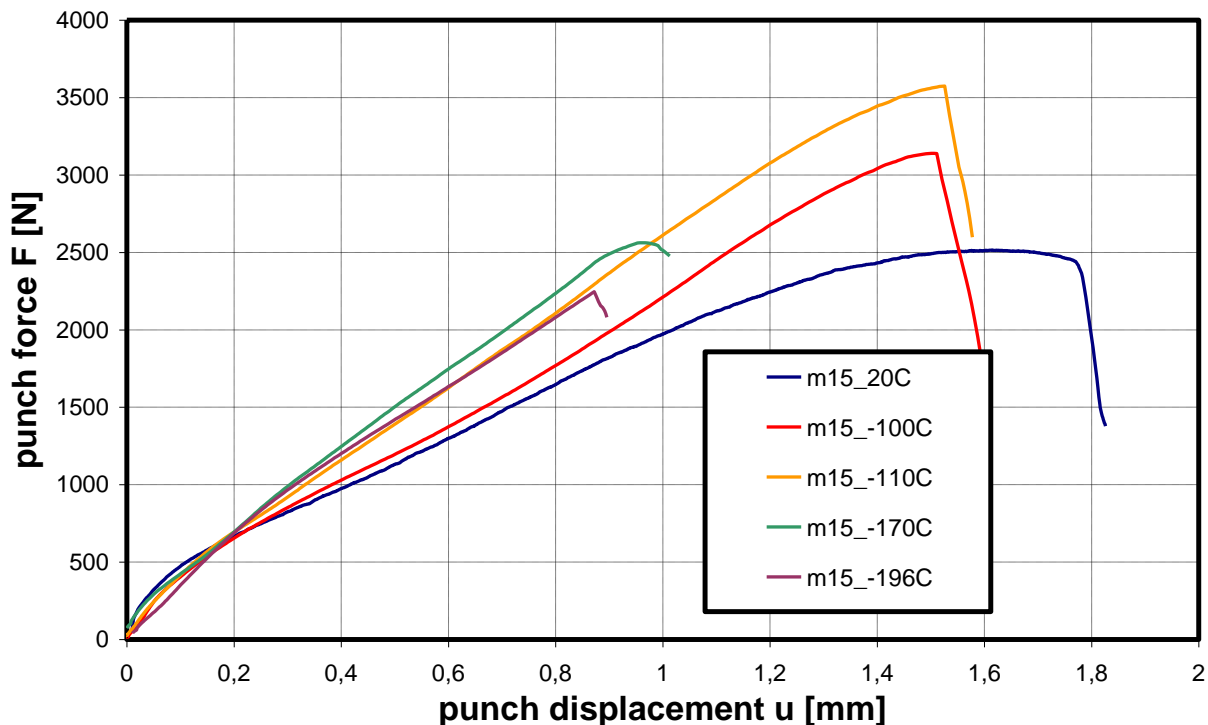
Obr. 106 Uspořádání testu SPT pro teploty do -196°C ; **a)** Komora do -130°C , **b)** přípravek v lázni tekutého dusíku, **c)** měření teploty během testu

Zkoušky byly naměřeny v rozmezí teplot $+20^\circ\text{C}$ až -196°C a na základě záznamů byla vyhodnocena SP energie. Přechodová teplota z SPT byla vypočítána dle vztahu (51), kde E_{max} je maximální energie měřená během testu a E_{min} je energie rovnající se 200 mJ. Při snižujících se teplotách testů (do určité kritické teploty) materiál zpevňuje (roste F_m) a zároveň obvykle klesá hodnota deformace u_m . Pokud je pokles u_m menší než nárůst F_m , může se lomová energie dokonce se snižující se teplotou zvyšovat (roste plocha pod křivkou SPT). Při dosažení určité kritické teploty pro daný materiál začíná klesat také F_m a spolu s pokračujícím poklesem u_m lomová energie klesá. Tento jev ilustrují záznamy pro materiál m15 na **Obr. 107**.

Výsledky měření jsou uvedeny v **Tab. 42** a **Tab. 43**. Vyhodnocené přechodové teploty pro oba materiály jsou shrnuty v **Tab. 44**. Naměřené přechodové křivky SPT vyhodnocené z lomové energie jsou na **Obr. 108** a **Obr. 109**. Zde jsou uvedeny společně s předchozími přechodovými křivkami měřenými na standardních Charpy vzorcích $10 \times 10 \times 55$ mm a mini-Charpy vzorcích $3 \times 4 \times 27$ mm vyhodnocených na základě podílů křehkého lomu. Toto srovnání má za cíl ilustrovat

posunutí tranzitní teploty v závislosti na použité metodě. Naměřené hodnoty přechodových teplot jsou ve shodě s teorií, že se snižující se velikostí tělesa klesá také náchylnost ke křehkému lomu [22]. Pro Charpy tělesa s průřezem 10x10 mm byla naměřena nejvyšší přechodová teplota (+14,3 °C pro materiál m08 a -39,3 °C pro m15), pro mini-Charpy tělesa se naměřená přechodová teplota snížila o více než 60 °C a nejnižší přechodové teploty byly naměřeny při SPT.

Naměřené hodnoty přechodových teplot jsou dále diskutovány v kapitole 6.6.2. Přechodové teploty byly měřeny jen pro dva materiály a pro verifikaci uvedených předpokladů by bylo třeba tato měření rozšířit o další materiály.



Obr. 107 Změny křivek SPT pro různé teploty zkoušek, materiál m15

Tab. 42 Výsledky měření SPT přechodové teploty pro materiál m08

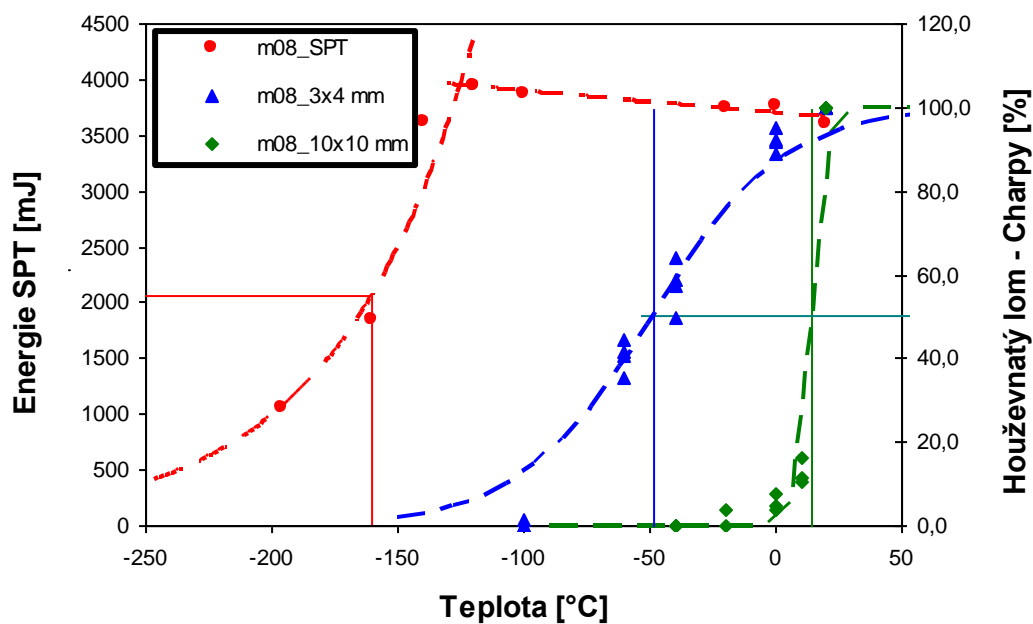
vzorek	Teplota °C	E^{SP} mJ
m08_+20°C	20	3610
m08_0°C	0	3765
m08_-20°C	-20	3741
m08_-100°C	-100	3878
m08_-120°C	-120	3941
m08_-140°C	-140	3627
m08_-160°C	-160	1850
m08_-196°C	-196	1055

Tab. 43 Výsledky měření SPT přechodové teploty pro materiál m15

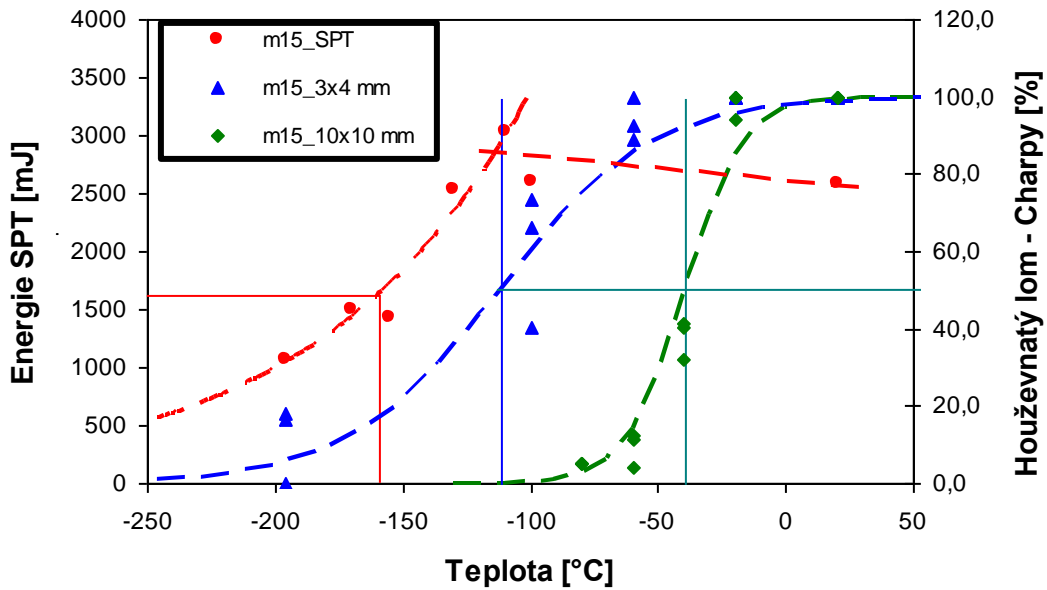
vzorek	Teplota °C	E ^{SP} mJ
m15_+20°C	20	2583
m15_-100°C	-100	2605
m15_-110°C	-110	3038
m15_-130°C	-130	2540
m15_-155°C	-155	1437
m15_-170°C	-170	1500
m15_-196°C	-196	1072

Tab. 44 Výsledky měření SPT přechodové teploty pro materiály m08 a 015

Materiál	T _{SP} °C	T _{SP} K
m08	-160,7	112,3
m15	-159,0	114,0



Obr. 108 SPT přechodové křivky a jejich srovnání s *FATT*₅₀ měřených na vzorcích 10x10x55 mm a 3x4x27 mm, materiál m08



Obr. 109 SPT přechodové křivky a jejich srovnání s $FATT_{50}$ měřených na vzorcích 10x10x55 mm a 3x4x27 mm, materiál m15

6.6. Určení korelačních vztahů mezi výsledky SPT a standardních zkoušek

Určení korelačních vztahů mezi výsledky SPT a standardních zkoušek je jedním ze stěžejních cílů této práce. Při akutním nedostatku experimentálního materiálu lze zkoušet mechanické vlastnosti jen pomocí velmi malých zkušebních těles, které se využívají např. u SPT. Použití výsledků získaných přímo ze SPT je však v praxi často obtížně použitelné a bez předchozích korelací na standardní mechanické hodnoty je lze jen těžko využít (např. pro odhad zbytkové životnosti, hodnocení kvality materiálů, posouzení změny mechanických vlastností). V případě této práce se jedná o korelace na standardní mechanické charakteristiky R_m , $R_{p0,2}$, $FATT_{50}$, J_{IC} . V následujících podkapitolách jsou uvedeny možné korelační vztahy a bude diskutována spolehlivost těchto korelací.

6.6.1. Vyhodnocení tahových vlastností na základě zkoušek SPT

Jak bylo řečeno v kapitole 5.2.5, získané hodnoty ze SPT F_m a F_e lze korelovat pomocí empirických rovnic na mez pevnosti R_m a mez kluzu $R_{p0,2}$. Pro tyto korelace byly použity výsledky uvedené v kapitolách 6.2 a 6.5.2. Průměrné hodnoty charakteristik relevantní pro korelace na mez pevnosti a mez kluzu a jsou shrnuty v Tab. 45. Pro získání těchto hodnot bylo měřeno 45 tahových testů a 121 SPT pro 19 materiálů. Na Obr. 110 jsou vyneseny závislosti meze pevnosti na maximální síle při SPT. Hodnota spolehlivosti R^2 je v prvním případě menší než 0,5. Toto je způsobeno materiály m14 a m18, tedy materiály, které u zkoušek lomové houževnatosti vykazovaly křehké porušení. Při vyjmutí těchto materiálů z korelace je hodnota spolehlivosti R^2 již 0,9712.

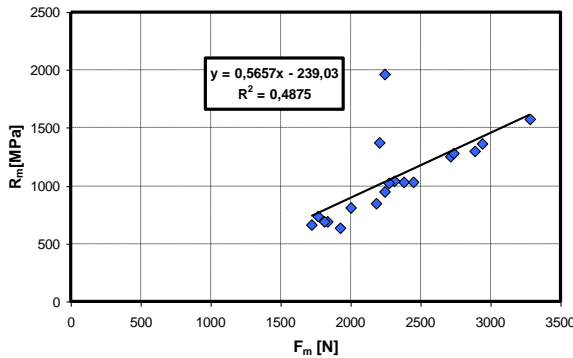
Problematické korelace z křehkých materiálů na tahové vlastnosti lze v tomto případě částečně kompenzovat normalizací síly, tj. podělit ji násobkem počáteční tloušťky a posunutím odpovídající maximální síle při SPT ($F_m/(h_0 \cdot u_m)$). Tato korelace je vyobrazena na Obr. 111

s hodnotou spolehlivosti $R^2=0,9486$. Dle naměřených výsledků lze pro odhad meze pevnosti ze SPT použít vztah (75).

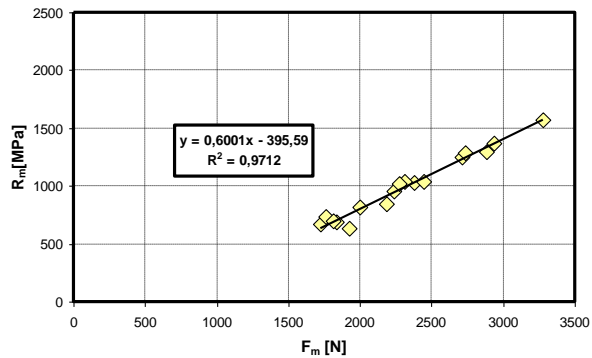
Analogicky bylo postupováno při určení korelační rovnice (73) pro výpočet meze kluzu, viz **Obr. 112**. Tato korelace vykazuje podstatně menší hodnotu spolehlivosti R^2 , která činí 0,7358. Při zpětném výpočtu na mez pevnosti ze SPT dle vztahu (73) se jako problematický jeví materiál m7 (MoNiCr – jediná neželezná slitina), kdy relativní chyba činí 88,3%. Částečně je možné tuto extrémní chybu snížit zadáním podmínky, aby korelační přímka protínala nulovou souřadnici obou os (viz vztah (74)). Hodnota R^2 se tím sice sníží na 0,7091, ale maximální chyba poklesne na 49,3%. Hodnoty tahových vlastností vypočítaných dle vztahů (73) - (75) včetně výpočtu absolutní a relativní chyby (error) jsou shrnuty v **Tab. 46**.

Tab. 45 Výsledky zkoušky tahem a SPT

Materiál	SPT - výsledky			Tah - výsledky	
	F_m N	F_e N	u_m mm	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]
m1	3280,6	632,9	1,50	1353,8	1574,8
m2	2238,7	346,2	1,69	881,3	952,4
m3	2884,8	449,7	1,68	1130,0	1298,4
m4	2377,8	393,6	1,59	991,7	1029,8
m5	1722,9	239,0	1,74	586,4	668,1
m6	2309,1	366,9	1,67	969,1	1039,4
m7	1924,5	183,8	2,08	246,3	638,3
m8	2709,8	507,5	1,59	1145,5	1252,1
m9	2937,4	654,6	1,58	1168,5	1365,6
m10	2732,2	678,4	1,60	1166,6	1285,6
m11	2275,1	516,3	1,59	981,1	1022,1
m12	1999,6	505,3	1,65	812,0	816,0
m13	1763,2	442,3	1,67	661,2	734,0
m14	2240,5	703,8	0,84	1219,6	1965,0
m15	2445,7	454,3	1,59	932,0	1034,2
m16	2185,4	366,5	1,66	726,8	844,7
m17	1836,4	282,9	1,70	528,4	688,3
m18	2202,3	533,2	0,96	1291,9	1373,9
m19	1812,5	259,0	1,64	534,7	696,2



a)

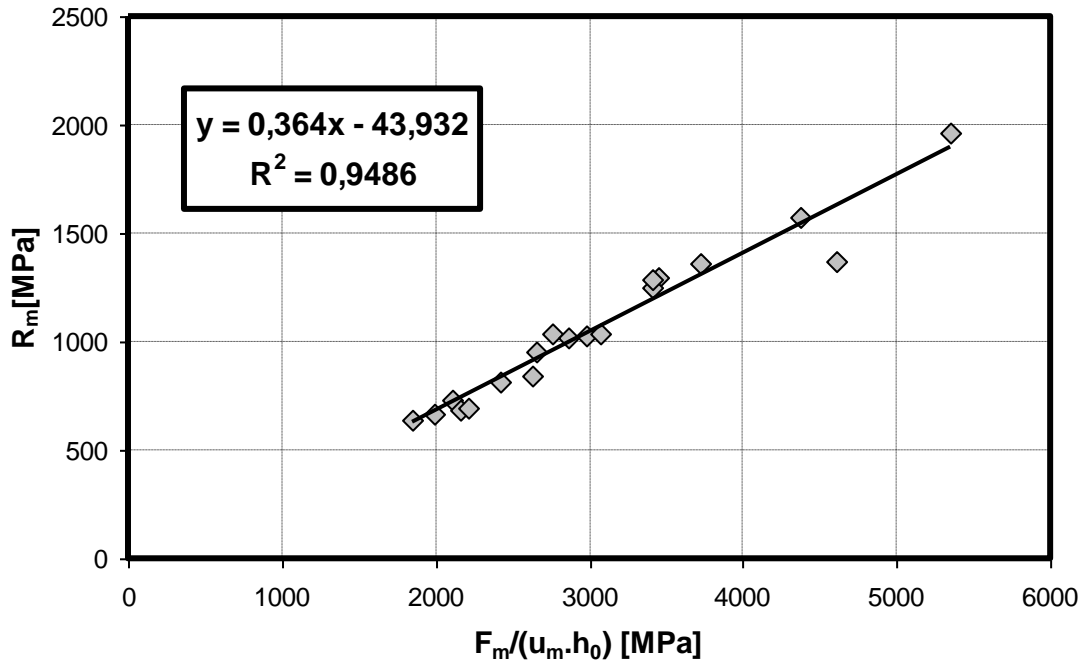


b)

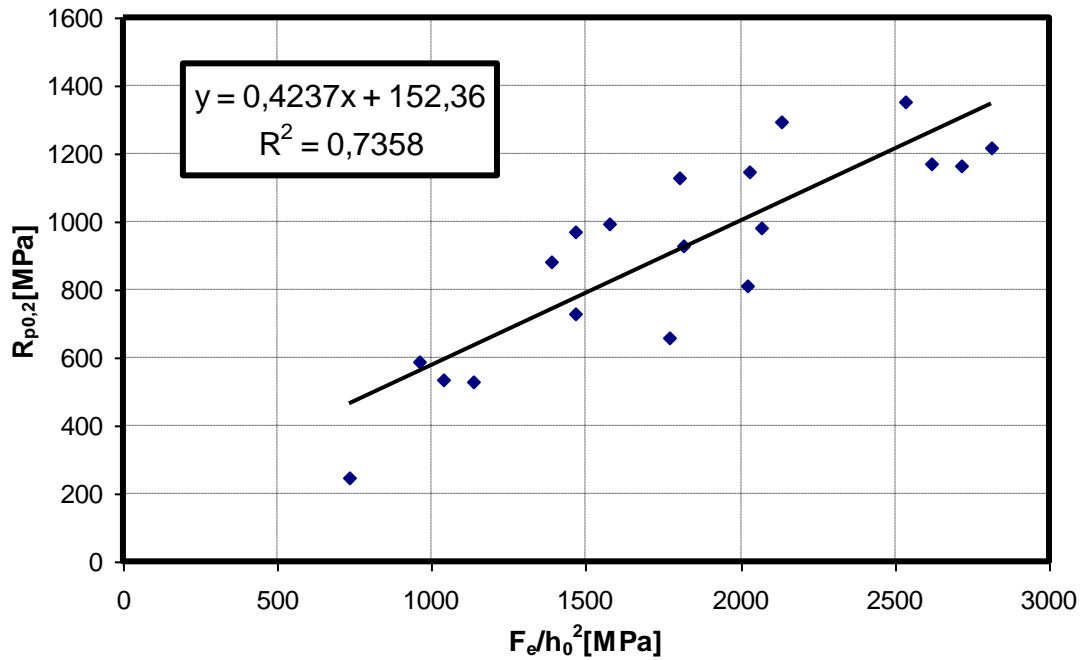
Obr. 110 Závislost meze pevnosti na maximální síle

a) pro všechny materiály

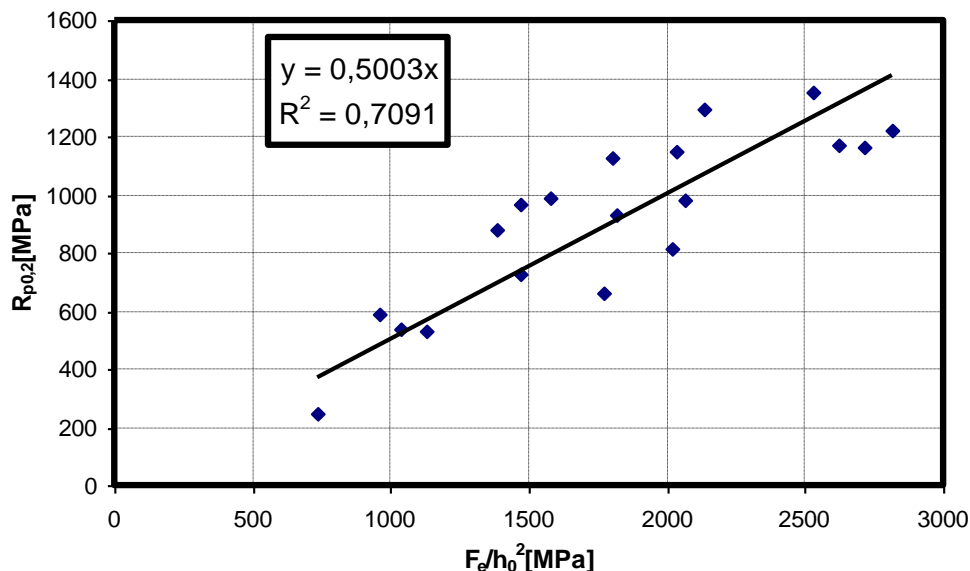
b) bez materiálů m14 a m18 porušujících se křehce při zkouškách lomové houževnatosti



Obr. 111 Závislost meze pevnosti na normalizované maximální síle F_m ze SPT



Obr. 112 Závislost meze kluzu na normalizované síle F_e ze SPT



Obr. 113 Závislost meze kluzu na normalizované síle F_e ze SPT, korelační přímka prochází nulovou souřadnicí obou os

$$R_{p0,2} [MPa] = 0,4237 \left(\frac{F_m}{h_0^2} \right) \left[\frac{N}{mm^2} \right] + 152,36 \quad (73)$$

$$R_{p0,2} [MPa] = 0,5003 \left(\frac{F_m}{h_0^2} \right) \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (74)$$

$$R_m [MPa] = 0,3640 \left(\frac{F_m}{h_0 \cdot u_m} \right) \left[\frac{N}{mm^2} \right] - 43,93 \quad (75)$$

Tab. 46 Hodnoty tahových vlastností vypočítaných dle vztahů (73) - (75)

Materiál	Tah - výsledky		R _{p0,2} -výpočet dle (73)			R _{p0,2} -výpočet dle (74)			R _m -výpočet dle (75)		
	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	korelace MPa	error MPa	error %	korelace MPa	error MPa	error %	korelace MPa	error MPa	error %
m1	1353,8	1574,8	1225,0	128,8	9,5	1266,6	87,3	6,4	1545,6	29,3	1,9
m2	881,3	952,4	739,1	142,2	16,1	692,8	188,5	21,4	920,2	32,2	3,4
m3	1130,0	1298,4	914,6	215,4	19,1	900,0	230,0	20,4	1209,2	89,2	6,9
m4	991,7	1029,8	819,4	172,3	17,4	787,6	204,0	20,6	1041,9	-12,0	1,2
m5	586,4	668,1	557,4	29,0	5,0	478,2	108,2	18,4	678,7	-10,5	1,6
m6	969,1	1039,4	774,2	194,9	20,1	734,2	234,9	24,2	961,2	78,2	7,5
m7	246,3	638,3	463,9	-217,6	88,3	367,9	-121,5	49,3	628,8	9,6	1,5
m8	1145,5	1252,1	1012,5	133,0	11,6	1015,6	129,9	11,3	1197,1	55,0	4,4
m9	1168,5	1365,6	1261,8	-93,2	8,0	1310,0	-141,4	12,1	1309,8	55,8	4,1
m10	1166,6	1285,6	1302,1	-135,5	11,6	1357,6	-191,0	16,4	1198,8	86,8	6,8
m11	981,1	1022,1	1027,4	-46,3	4,7	1033,2	-52,1	5,3	999,0	23,1	2,3
m12	812,0	816,0	1008,7	-196,7	24,2	1011,2	-199,1	24,5	837,3	-21,3	2,6
m13	661,2	734,0	902,0	-240,7	36,4	885,1	-223,9	33,9	724,3	9,6	1,3
m14	1219,6	1965,0	1345,1	-125,5	10,3	1408,4	-188,7	15,5	1901,5	63,6	3,2
m15	932,0	1034,2	922,3	9,7	1,0	909,1	22,9	2,5	1073,3	-39,1	3,8
m16	726,8	844,7	773,5	-46,7	6,4	733,4	-6,6	0,9	913,9	-69,2	8,2
m17	528,4	688,3	631,8	-103,4	19,6	566,1	-37,7	7,1	742,3	-54,0	7,8
m18	1291,9	1373,9	1056,0	236,0	18,3	1067,0	225,0	17,4	1632,9	-258,9	18,8
m19	534,7	696,2	591,3	-56,6	10,6	518,3	16,4	3,1	760,9	-64,7	9,3

6.6.2. Vyhodnocení přechodové teploty na základě zkoušek SPT

Na základě výsledků měření přechodové teploty na Charpy vzorcích a pomocí SPT byl stanoven koeficient α_{SPT} dle rovnice (76), viz **Tab. 47**. Pro materiál m08 činí jeho hodnota 0,39 a pro m15 činí 0,49. Ačkoli jsou obě hodnoty v intervalu měřeném i jinými laboratořemi, kvůli značnému rozdílu je zřejmé, že koeficient α_{SPT} je materiálově závislý a jeho použitelnost se musí pro každý typ materiálu znovu verifikovat. Pro úplnost je v **Tab. 47** uveden i posun teplot Δt mezi přechodovou teplotou $FATT_{50}$ pro tělesa 10x10x55 mm a 3x4x27 mm. Z hlediska rozptylu hodnot se jeví zkoušky na mini-Charpy tělesech jako vhodnější, což lze zdůvodnit podobným způsobem zatěžování. Možností vyhodnotit $FATT_{50}$ pomocí mini-Charpy těles se již zabývala kapitola 6.3.4.2.

$$\alpha_{SPT} = \frac{T_{SP}}{DBTT_{Charpy}} \quad (76)$$

Tab. 47 Hodnoty koeficientu α_{SPT}

Materiál	T_{SP} K	FATT 10x10 K	FATT 3x4 K	α	Δt Charpy
m08	112,3	287,3	224,2	0,39	63,1
m15	114,0	233,7	161,3	0,49	72,4

6.6.3. Vyhodnocení lomové houževnatosti na základě zkoušek SPT

Pro vyhodnocení lomové houževnatosti ze SPT je nejčastěji využívána efektivní lomová deformace ε_f , viz kapitola 5.2.4.3. Její hodnotu lze určit dvěma způsoby:

1. Na základě měření nejužšího místa pomocí metalografického výbrusu a následném měření h_f optickým mikroskopem.
2. Na základě výpočtu - hodnota deformace při lomu u_f vyhodnocená ze záznamu se dosadí do druhé části rovnice (77).

Druhá možnost je méně pracná a umožňuje hodnotu ε_f vyhodnocovat automaticky. Vztah mezi těmito dvěma veličinami udává rovnice (77).

$$\varepsilon_f = \ln\left(\frac{h_0}{h_f}\right) = \beta_{SP} * \left(\frac{u_f}{h_0}\right)^{x_{SP}} \quad (77)$$

Na **Obr. 114** jsou vyneseny hodnoty mezi $\ln(h_0/h_f)$ a $\ln(u_f/h_0)$ pro materiály m08 až m19. Hodnota spolehlivosti R^2 činí 0,9616 a pro tyto materiály lze konstatovat, že pro vyhodnocení ε_f je možno použít oba přístupy. Koeficienty β_{SP} a x_{SP} byly optimalizovány na hodnoty 0,085 a 1,763, viz rovnice (78). Jako další způsob výpočtu efektivní lomové deformace ε_f , na základě vyhodnocené deformace u_f z grafu, lze použít rovnici (79). Ačkoli autorovi této práce není známo, že by byla v této formě publikována, její tvar lze lehko odvodit z rovnice regrese na **Obr. 114**. S užitím rovnice (79) vychází celková relativní odchylka menší.

V **Tab. 48** jsou uvedeny hodnoty ε_f vyhodnocené třemi různými způsoby. Za prvé, na základě měření h_f na metalografickém výbrusu (M), za druhé, vypočtené dle rovnice (78) s využitím hodnoty u_f vyhodnocené z grafu (G1) a za třetí vypočtené dle rovnice (79) (G2).

Jak bylo uvedeno v teoretické části, pro vyhodnocení lomové houževnatosti se doporučuje vyhodnotit zvláště materiály vykazující křehké (náhlé) šíření trhliny a houževnaté (vykazující

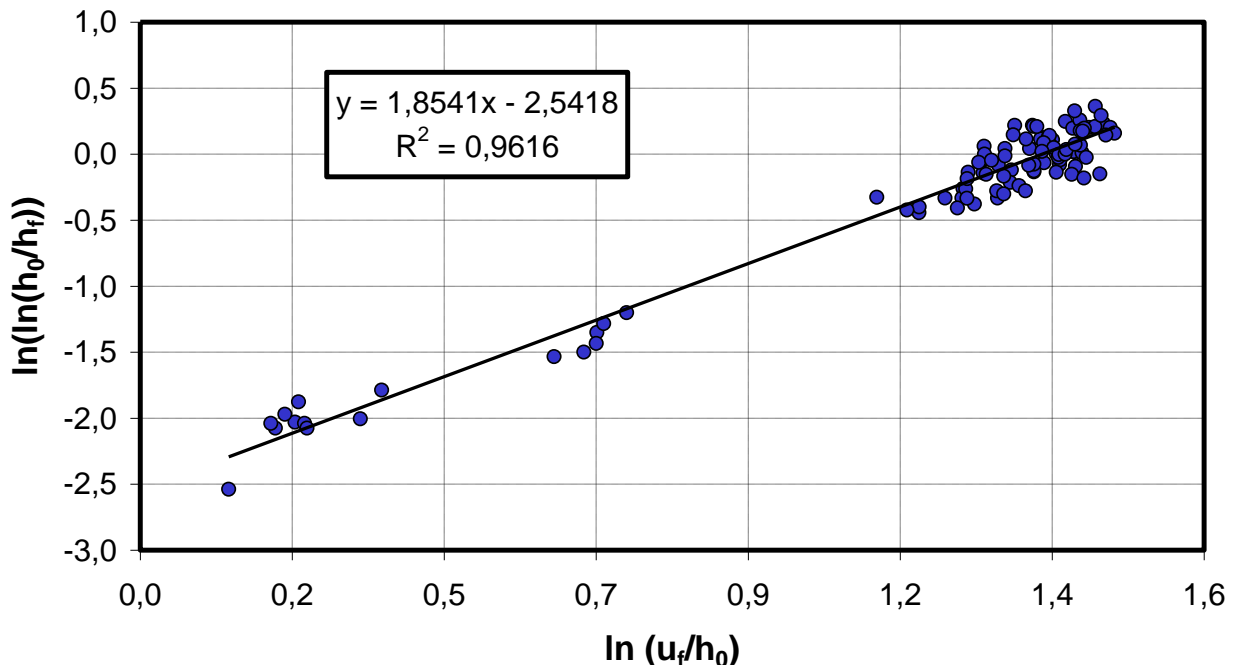
tvárné šíření trhliny). Za houževnaté materiály se často také označují materiály s hodnotou $\varepsilon_f > 0,25$ získanou ze SPT.

Pro křehké materiály je navrženo vyhodnocení dle rovnic (54) a (55). Při bližším zkoumání těchto rovnic je zřejmé, že takto vypočtená hodnota K_{IC} roste s rostoucí silou F_m při SPT. Tento přístup je však minimálně pro některé materiály problematický, neboť např. materiál m08 při zkouškách LH vykazoval pro nižší teploty i nižší hodnoty LH (toto bylo experimentálně ověřeno), zatímco maximální síla u zkoušky SPT s klesající teplotou rostla až do teploty -110°C . Použití vztah (55) je tedy v tomto případě nedostačující, nevyhovující a zavádějící.

Nicméně pro zkoumané materiály bylo možno porovnat závislost ε_f (vyhodnocenou z metalografického výbrusu dle vztahu (43) – viz Tab. 48, ε_f (M)) na hodnotách J_{IC} (viz Tab. 32) pro všechny zkoumané materiály, a to včetně materiálů křehkých. Získaná závislost vykazuje lineární trend, viz Obr. 115.

Koeficienty v rovnici (53) byly stanoveny na: $k_{SP} = 267,2$, $J_0 = -1,5$ a korelační vztah pro zkoumané materiály je uveden v rovnici (80). Hodnota spolehlivosti R^2 činí 0,9616. V Tab. 49 jsou uvedeny hodnoty LH vypočítané dle rovnice (80) včetně výpočtu absolutní a relativní chyby (error).

Na měřených materiálech byla tedy prokázána velmi dobrá shoda při korelaci ε_f (a potažmo z SPT) na J_{IC} . Nicméně je nutné přihlédnout k výsledkům v publikované literatuře, kdy např. práce [52][53][68][69] uvádí tyto konstanty k_{SP} a J_0 s jinými hodnotami, a to někdy i podstatně odlišnými. Také z interních měření v laboratořích COMTES FHT a.s. vyplývá, že pro některé materiály tento přístup není možné použít a verifikace každého nového, typově odlišného, materiálu je mnohem důležitější než např. při korelacích na R_m .



Obr. 114 Závislost mezi $\ln(\ln(h_0/h_f))$ a $\ln(u_f/h_0)$ pro materiály m08-m19

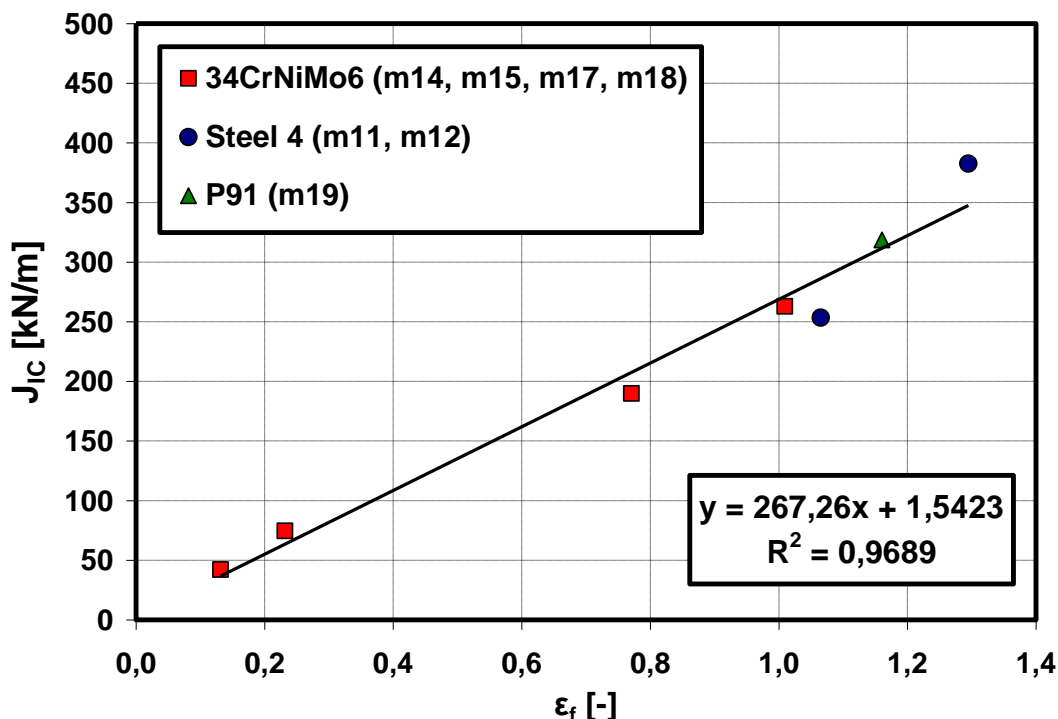
$$\varepsilon_f = 0,085 * \left(\frac{u_f}{h_0} \right)^{1,763} \quad (78)$$

$$\varepsilon_f = e^{1,854 \ln \left(\ln \frac{u_f}{h_0} \right) - 2,5418} \quad (79)$$

Tab. 48 Vyhodnocení efektivní lomové deformace ε_f na základě:

- 1) měření h_f na metalografickém výbrusu (M),
- 2) výpočtu dle rovnice (78) s využitím hodnoty u_f vyhodnocené z grafu (G1)
- 3) výpočtu dle rovnice (79) s využitím hodnoty u_f vyhodnocené z grafu (G2)

Materiál	u_f mm	h_f mm	ε_f (M) ---	ε_f (G1) ---	ε_f (G2) ---	ε_f (G1) error (%)	ε_f (G2) error (%)
m8	1,90	0,153	1,19	0,89	0,93	24,7	21,2
m9	1,85	0,191	0,96	0,86	0,89	11,0	7,1
m10	1,94	0,167	1,10	0,93	0,98	15,2	11,1
m11	2,01	0,172	1,07	0,99	1,04	7,5	2,7
m12	2,07	0,137	1,29	1,04	1,09	19,9	15,5
m13	2,14	0,136	1,30	1,10	1,16	15,7	10,9
m14	0,63	0,438	0,13	0,13	0,12	2,0	7,3
m15	1,75	0,231	0,77	0,77	0,80	0,0	3,8
m16	1,97	0,196	0,94	0,96	1,01	2,2	7,3
m17	2,09	0,182	1,01	1,06	1,12	5,1	10,9
m18	1,00	0,397	0,23	0,29	0,28	24,2	22,5
m19	2,09	0,157	1,16	1,06	1,11	9,0	3,9



Obr. 115 Závislost efektivní lomové deformace ε_f na lomové houževnatosti J_{IC}

$$J_{IC} = 267,3 \cdot \varepsilon_f + 1,54 \quad (80)$$

Tab. 49 Hodnoty LH vypočítané dle vztahu (80)

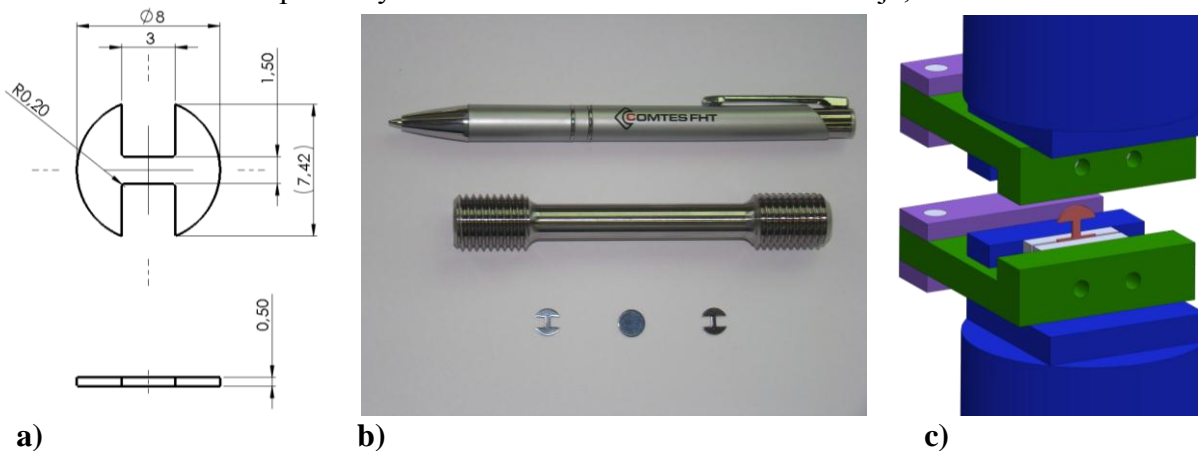
Materiál	Výsledky měření		J _{IC} -výpočet dle (80)		
	ε _f (M) ---	J _{IC} kN/m	korelace kN/m	error kN/m	error %
m11	1,07	253,5	286,2	32,8	12,9
m12	1,29	382,6	347,5	35,1	9,2
m14	0,13	42,1	36,7	5,4	12,9
m15	0,77	189,9	207,5	17,6	9,3
m17	1,01	263,0	271,3	8,3	3,2
m18	0,23	74,7	63,5	11,2	15,0
m19	1,16	318,7	311,7	7,0	2,2

6.7. Mikro-tahové testy (M-TT)

Motivace pro zavedení zkoušky M-TT je zmíněna v teoretické části v kapitole 5.3. Následující podkapitoly popisují vznik, princip, návrh nejjvhodnější metodiky měření a možné využití těchto testů.

6.7.1. Návrh zkušebního tělesa a princip zkoušky M-TT

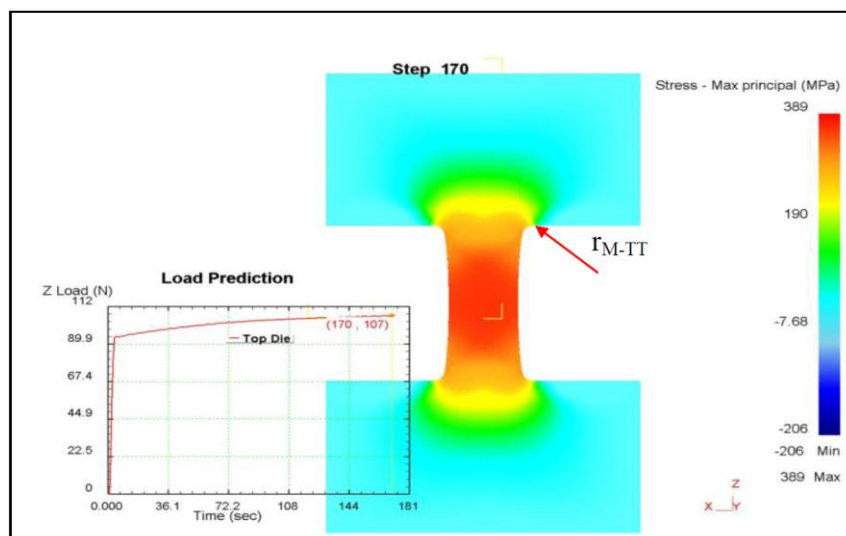
Pro určení tahových vlastností kovových materiálů a při současném zachování výhody spotřeby velmi malého množství experimentálního materiálu byla na základě velikosti a tvaru SPT navržena geometrie pro mikro-tahové těleso, viz Obr. 116a. Srovnání velikosti mezi standardním a mikro-tahovým tělesem je vyobrazeno na Obr. 116b. Pro takový typ tělesa bylo nutné navrhnout čelisti pro uchycení do univerzálního zkušebního stroje, viz Obr. 116c.



Obr. 116 a) Mikro-tahové těleso, b) porovnání se standardním tělesem, c) model čelistí navržených pro uchycení mikro-tahového tělesa do zkušebního stroje

Tvar zkušebního tělesa byl navrhnout i s ohledem na výrobitelnost a reprodukovatelnost tvaru při výrobě a v neposlední řadě i kvůli možnosti vyrobít ho již z existujících SPT disků (např. pokud již byly vystaveny tepelné expozici nebo ozáření, např. jako svědečné vzorky v elektrárnách). Délka tělíčka 3 mm a rádius 0,2 mm jsou negativní tvary obráběcího nástroje

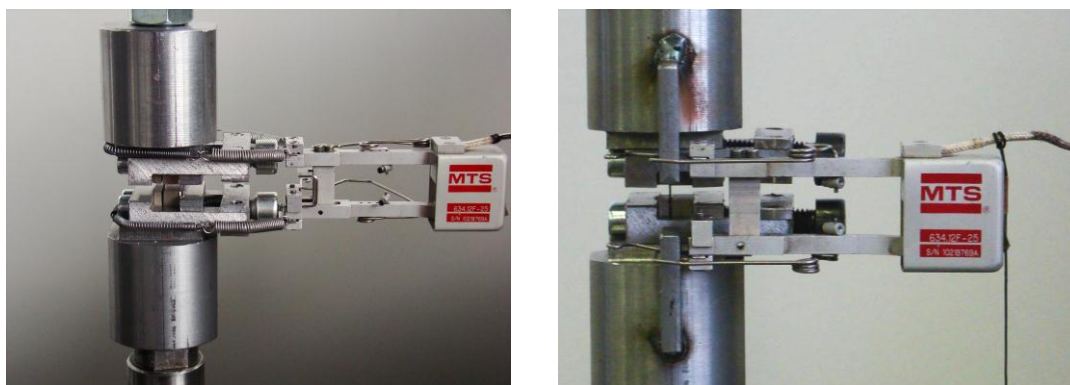
(řezné destičky). Následně byla geometrie M-TT verifikována za použití metody konečných prvků (MKP) v programu DEFORM. Bylo sledováno rozložení napětí mezi tělem a hlavou zkušebního tělesa. Na **Obr. 117** je zobrazena analýza rozložení napětí v M-TT tělese při maximálním zatížení. Z této analýzy vyplývá, že největší napětí při maximálním zatížení je uprostřed těla tělesa a provedené experimenty tento předpoklad potvrzují – tělesa z velké části praskají uprostřed.



Obr. 117 Rozložení napětí v M-TT tělese při maximálním zatížení [75]

6.7.2. Princip a první provedení M-TT

Samotná zkouška M-TT probíhá ve stejném módu zatěžování a při stejných deformačních rychlostech jako standardní zkouška tahem prováděná dle normy [14]. Při prvních testech (začátek roku 2011) bylo k měření deformace těles použito extenzometru připevněného na čelistech, viz **Obr. 118**.



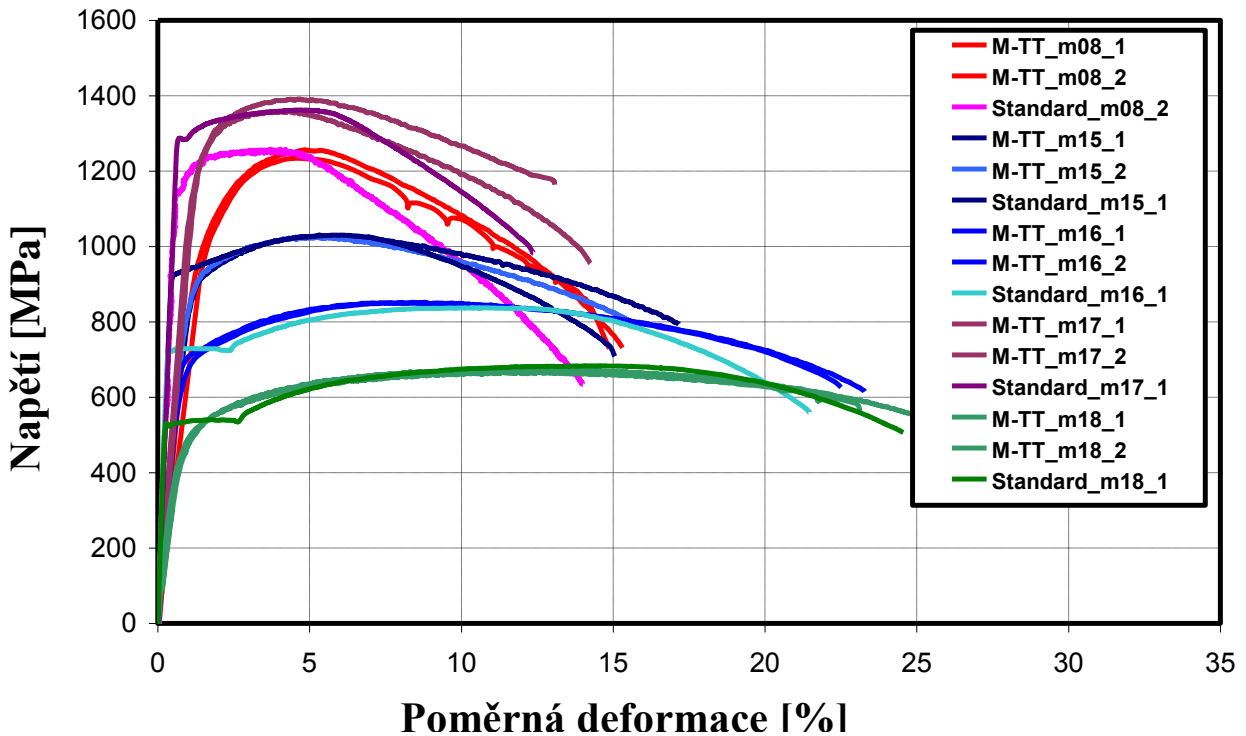
Obr. 118 Dva možné způsoby chycení extenzometru na čelisti

Vhodnost takto navržené zkoušky byla ověřena na materiálech m08, m15, m16, m17 a m18. Stejně jako v případě standardní zkoušky tahem byly zaznamenány hodnoty síly v N a deformace v mm, které se převedly na souřadnice smluvní napětí - poměrná deformace dle vztahů (2) a (3). Do vztahu (3) byl za hodnotu L_0 dosazen celkový rozměr délky tělíčka 3 mm.

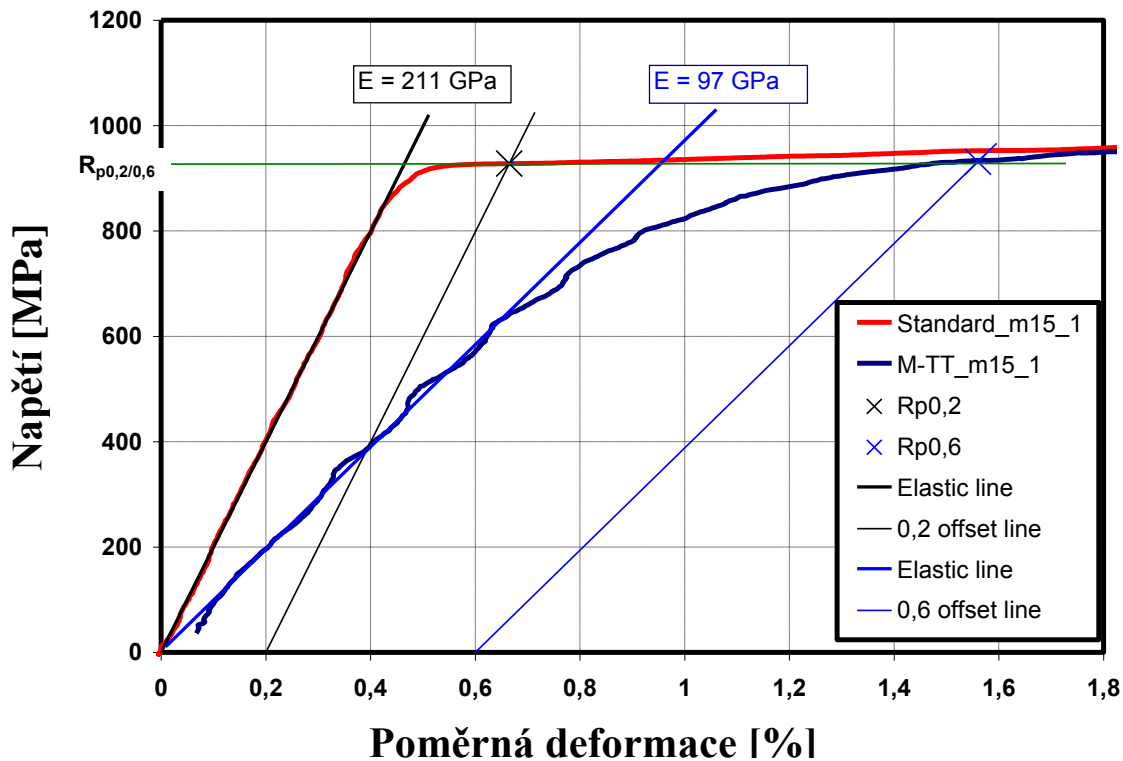
Získané záznamy z těchto zkoušek jsou na **Obr. 119** spolu se záznamy ze standardních tahových testů. Získané záznamy z M-TT tedy již není třeba korelovat pomocí empirických vztahů, mají stejný průběh jako standardní tahové testy a lze z nich vyhodnotit všechny standardní tahové charakteristiky: $R_{p0,2}$, R_m , A_g , A a Z . Zároveň požadavek zachování minimálního objemu experimentálního materiálu zůstává, stejně jako v případě SPT, splněn.

Při snímání deformace mechanickým extenzometrem však dochází ke zkreslení měření, zejména na začátku zkoušky, což se projevuje na snížené hodnotě Youngova modulu pružnosti. Ukázka počátečního rozdílu v záznamu s vyhodnocením meze kluzu je vyobrazena na **Obr. 120**. Na tomto obrázku je zároveň ukázáno, že pro získání stejné meze kluzu u M-TT jako v případě standardní zkoušky je nutné posunout rovnoběžku (offset line) s počáteční přímkovou částí (elastic line) o 0,6 % poměrné deformace (místo o obvyklých 0,2%).

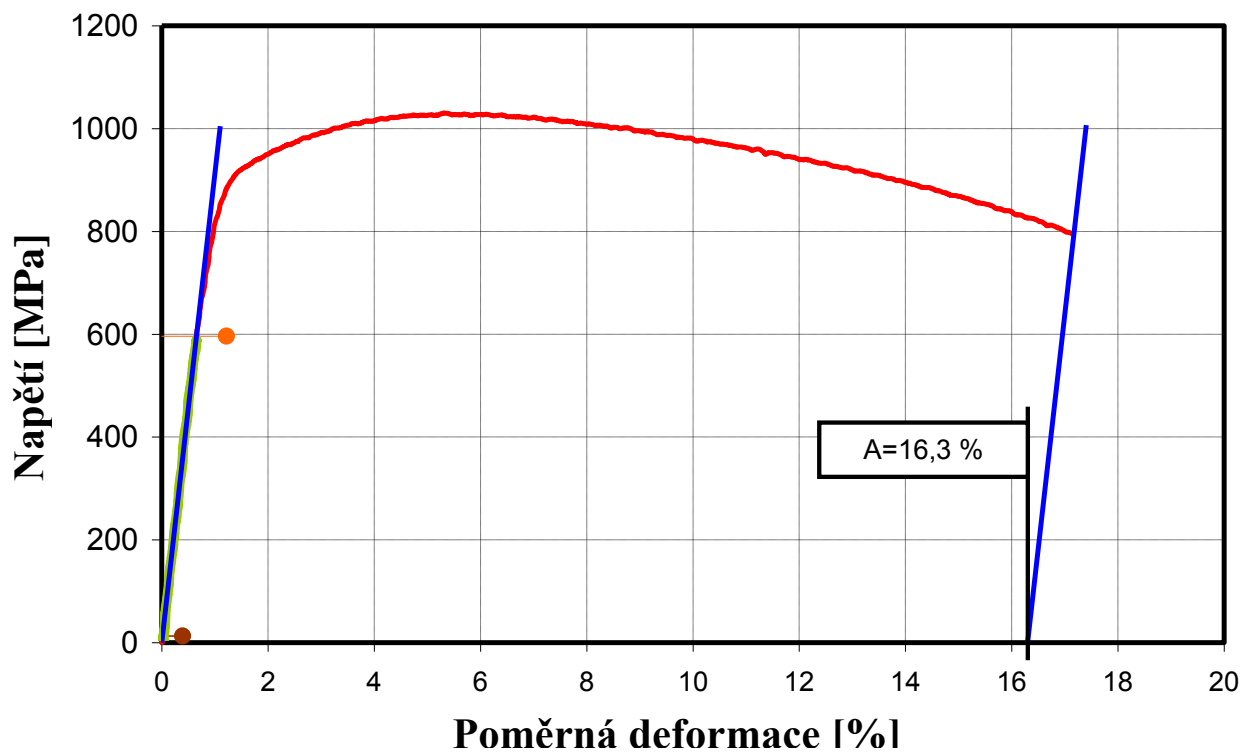
Vyhodnocení tažnosti je možné provést na základě měření na stereomikroskopu s digitálním zpracováním záznamu (viz **Obr. 122**) nebo vyhodnocení provést přímo z grafu (viz **Obr. 121**). Oba přístupy vedou k téměř stejným výsledkům. Vyhodnocení kontrakce je prováděno na základě měření nejužších míst po zkoušce, viz **Obr. 122**. Výsledky měření jsou shrnuty v **Tab. 50** a porovnání M-TT se standardní tahovou zkouškou včetně výpočtu relativní chyby (error) v **Tab. 51**. Pevnostní hodnoty byly vyhodnoceny s relativní chybou do 5%, tažnost do 10% a kontrakce do 15%.



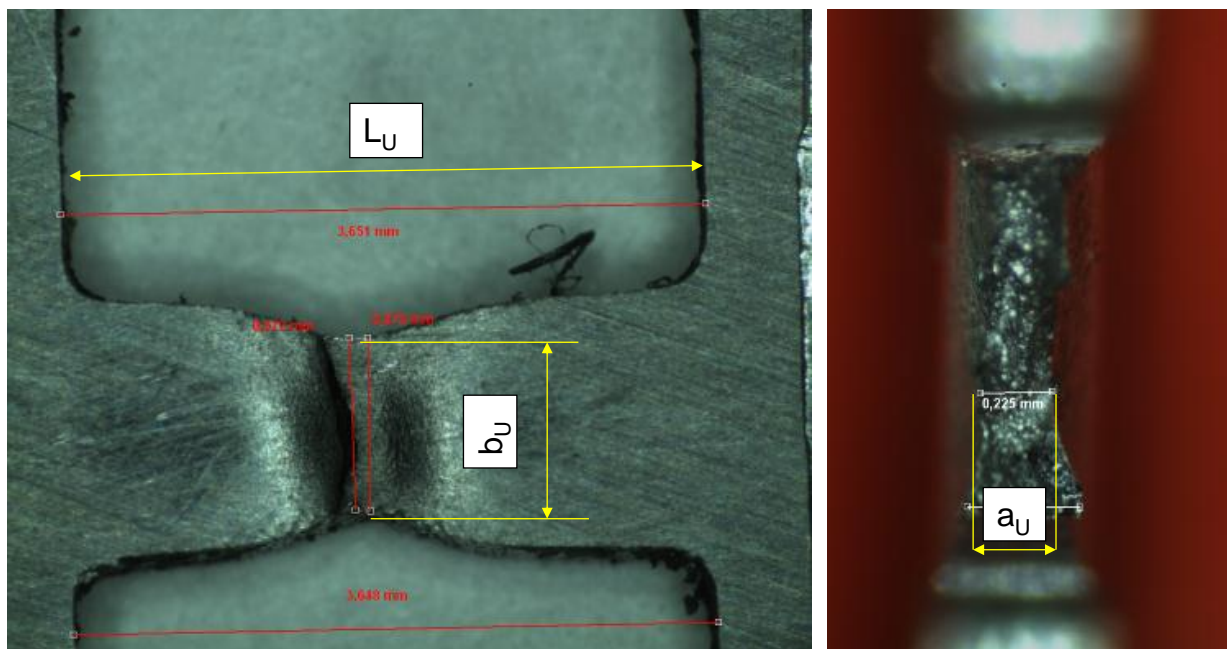
Obr. 119 Záznamy M-TT spolu se záznamy standardní zkoušky tahem pro materiály m08, m15-m18



Obr. 120 Záznamy M-TT_m15_1 a standardního tahového testu m15_1, ukázka vyhodnocení meze kluzu



Obr. 121 Příklad vyhodnocení tažnosti ze záznamu M-TT_m15_1



Obr. 122 Příklad vyhodnocení tažnosti a kontrakce na stereomikroskopu

Tab. 50 Výsledky měření M-TT

Vzorek	a_0 [mm]	b_0 [mm]	a_u [mm]	b_u [mm]	S_0 [mm ²]	S_u [mm ²]	$R_{p0,6}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_3 [%]	Z [%]
M-TT_m08_1	0,48	1,39	0,18	1,06	0,67	0,19	1074,0	1257,0	3,4	14,5	71,4
M-TT_m08_2	0,47	1,41	0,25	0,97	0,66	0,24	1124,0	1234,0	2,7	13,7	63,8
průměr	0,48	1,40	0,21	1,02	0,66	0,22	1099,0	1245,5	3,0	14,1	67,6
M-TT_m15_1	0,49	1,50	0,24	1,10	0,73	0,26	926,6	1030,6	4,2	16,3	64,3
M-TT_m15_2	0,47	1,52	0,23	1,15	0,72	0,26	931,4	1026,0	4,2	15,1	63,8
průměr	0,48	1,51	0,23	1,12	0,73	0,26	929,0	1028,3	4,2	15,7	64,1
M-TT_m16_1	0,50	1,53	0,21	1,12	0,77	0,23	706,9	850,0	7,5	21,9	69,4
M-TT_m16_2	0,47	1,58	0,21	1,07	0,74	0,23	714,3	852,0	8,0	22,8	69,1
průměr	0,48	1,55	0,21	1,10	0,75	0,23	710,6	851,0	7,8	22,4	69,3
M-TT_m17_1	0,51	1,45	0,26	0,99	0,74	0,26	510,8	665,9	11,8	22,6	64,6
M-TT_m17_2	0,51	1,47	0,20	0,97	0,74	0,20	525,1	676,8	11,5	26,1	73,3
průměr	0,51	1,46	0,23	0,98	0,74	0,23	518,0	671,3	11,6	24,4	68,9
M-TT_m18_1	0,50	1,36	0,39	1,03	0,68	0,40	1298,5	1358,6	2,9	13,3	41,5
M-TT_m18_2	0,50	1,54	0,38	1,16	0,77	0,44	1286,1	1391,5	3,4	12,1	43,0
průměr	0,50	1,45	0,38	1,10	0,73	0,42	1292,3	1375,0	3,2	12,7	42,3

Tab. 51 Porovnání výsledků měření M-TT a standardní zkoušky tahem

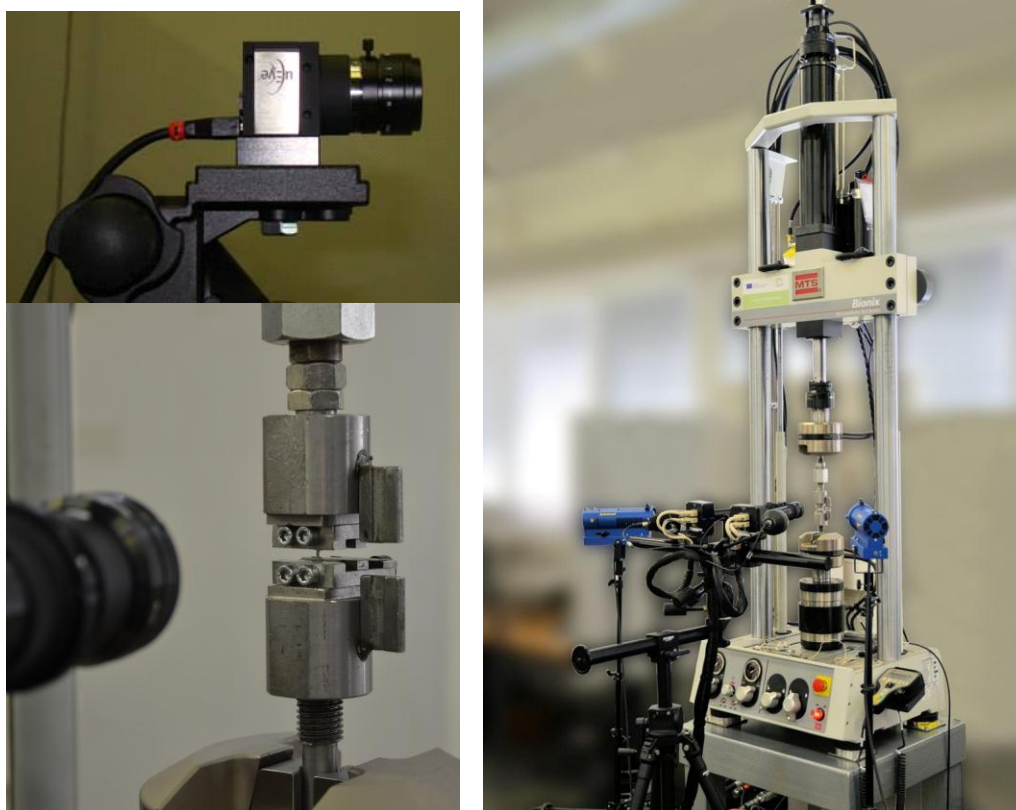
Materiál	$R_{p0,2/0,6}$ [MPa]		R_m [MPa]		A_g [%]		A [%]		Z [%]		error				
	Stand.	M-TT	Stand.	M-TT	Stand.	M-TT	Stand.	M-TT	Stand.	M-TT	$R_{p0,2}$ [%]	R_m [%]	A_g [%]	A [%]	Z [%]
m08	1145,5	1099,0	1252,1	1245,5	2,5	3,0	14,3	14,1	67,6	70,2	4,1	0,5	19,6	1,7	3,8
m15	932,0	929,0	1034,2	1028,3	5,4	4,2	15,6	15,7	64,1	55,8	0,3	0,6	22,3	0,7	13,0
m16	726,8	710,6	844,7	851,0	10,0	7,8	20,5	22,4	69,3	61,7	2,2	0,8	22,6	8,8	10,9
m17	528,4	518,0	688,3	671,3	13,7	11,6	24,8	24,4	68,9	63,1	2,0	2,5	15,1	1,8	8,4
m18	1291,9	1292,3	1373,9	1375,0	3,8	3,2	13,9	12,7	42,3	45,6	0,0	0,1	16,6	8,8	7,9

6.7.3. Měření deformace M-TT pomocí optických metod

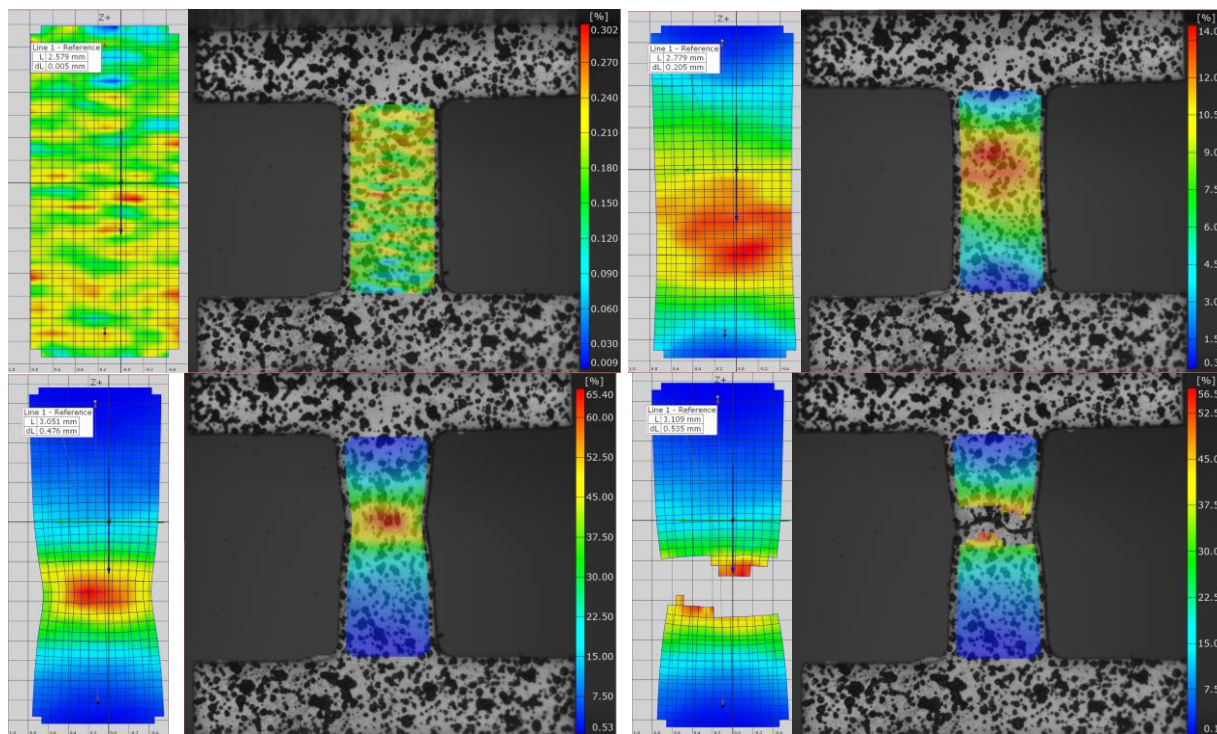
Velkou slabinou navržené zkoušky M-TT bylo měření deformace pomocí mechanického extenzometru, který umožňoval měření deformace během zkoušky jen nepřímo a projevovalo se velké zkreslení zejména na začátku zkoušky. Pro přesnější měření deformací bylo navrženo měřit deformaci opticky. V podmínkách laboratoře COMTES FHT a.s. bylo možno provést tato měření buď videoextenzometrem nebo pomocí optického systému ARAMIS (viz **Obr. 123**).

Následně se nejvíce osvědčilo měření deformace pomocí bezkontaktního měřicího systému ARAMIS, který využívá metody digitální obrazové korelace (Digital Image Correlation, DIC). DIC je moderní metodou měření pole deformací. Je založena na optickém sledování změn v obrazovém záznamu při mechanické zkoušce. Na zkoušený vzorek je nanesen náhodný kontrastní vzor (tzv. pattern), který je snímán jednou (2D) nebo více (3D) kamerami. DIC software pak sleduje změny vzoru v jednotlivých obrazech záznamu vůči referenčnímu obrazu. Touto metodou je možné velmi přesně měřit deformace a posuvy, a to jak na celém zkušebním tělese, tak lokálně v jednotlivých oblastech [76].

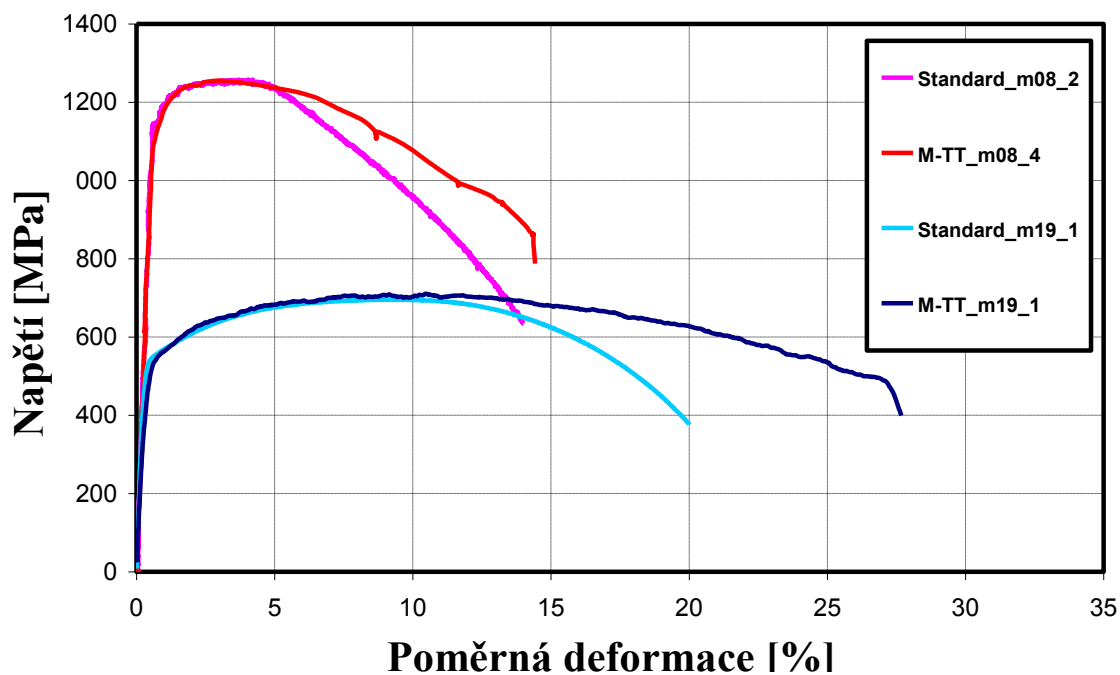
Pro snímání M-TT je použito 2D snímání a ARAMIS v tomto případě plní jen funkci videoextenzometru, kdy se měří vzdálenost dvou bodů na tělíčku tělesa, obvykle od sebe vzdálených 2,6 mm. Příklad měření M-TT v systému ARAMIS je zobrazen na **Obr. 124**, na kterém je zároveň možné pozorovat rozložení lokálních deformací během zkoušky. Záznam měřený videoextenzometrem (m08) a ARAMISEM (m19) je zachycen na **Obr. 125**. Do meze pevnosti jsou získané záznamy téměř totožné a mez kluzu se může vyhodnotit jako offset přímkové části na 0,2% deformace, tedy stejně jako $R_{p0,2}$.



Obr. 123 Videoextenzometr (vlevo nahoře) a ARAMIS pro měření deformací M-TT



Obr. 124 Průběh zkoušky M-TT zachycená systémem ARAMIS



Obr. 125 Porovnání záznamů ze standardní zkoušky tahem a M-TT měřené optickými metodami

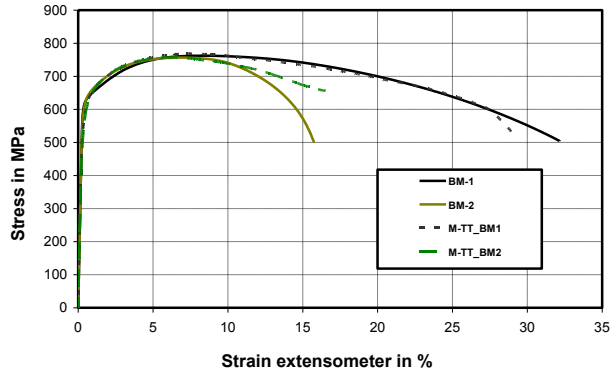
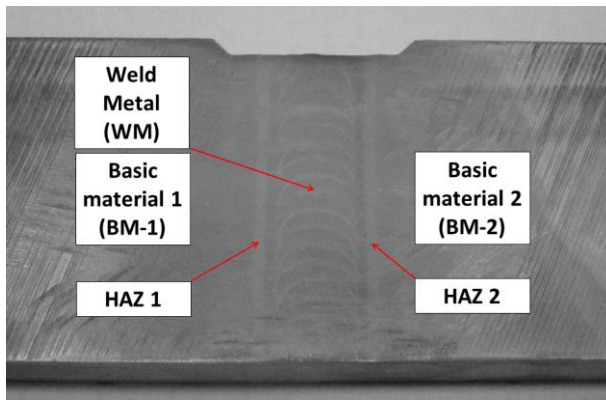
6.7.4. Oblasti použití M-TT

Kromě již zmíněných použití (měření tahových vlastností při nedostatku materiálu, hodnocení zbytkové životnosti, měření lokálních vlastností) je možno data z M-TT využít jako vstupní data pro počítačové simulace. Toho bylo prakticky využito např. při řešení projektu *TIP2 FR-TI2/279 Identifikace parametru tvarného porušení*, kdy se kromě základní geometrie zkoušela (z důvodů

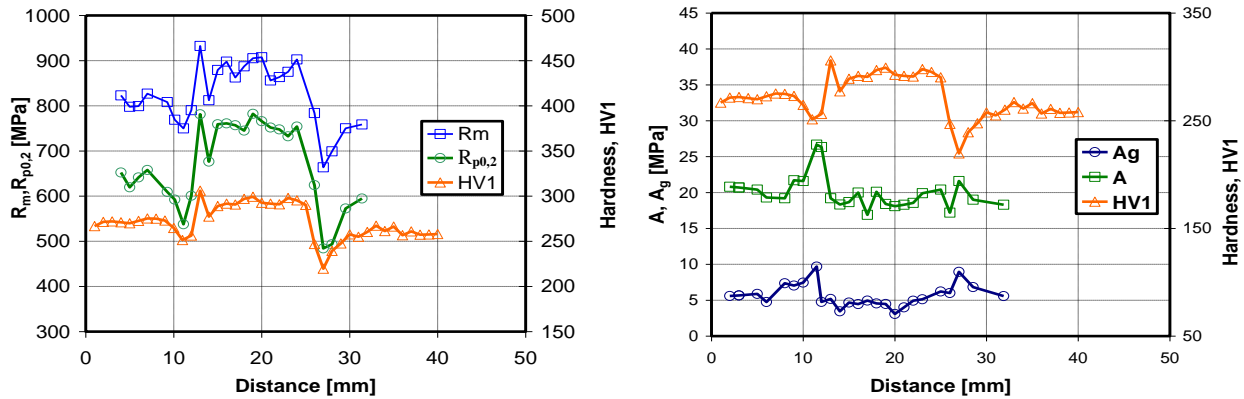
obdržení co největšího spektra módů namáhání) tělesa s různou tloušťkou a s tvarovým vybráním. S výhodou se dá těchto testů použít pro zkoušení a vyhodnocení anizotropie materiálů a oproti SPT je tato metoda mnohem citlivější a vhodnější. Typickým příkladem jsou tenkostěnné trubky, u kterých lze porovnat vlastnosti jak v podélném, tak tečném směru (tedy anizotropii materiálu).

M-TT lze také použít pro měření lokálních vlastností, např. rozložení mechanických vlastností napříč svarovým spojem. Takové měření bylo provedeno a popsáno v práci [11]. V této práci byla nejdříve verifikována metoda M-TT, kdy se srovnávaly záznamy ze standardních testů a M-TT (viz **Obr. 126** vlevo). Poté byl celý svar rozřezán v příčném směru a byla vyrobena mikrotahovátělesa odebraná od výchozího místa vždy ve vzdálenosti po 1 mm. Ve stejné vzdálenosti byla měřena také tvrdost HV1. Výsledky tohoto měření jsou na **Obr. 127**.

Díky krátké délce paralelní části tělíčka (2,6 mm) lze na těchto vzorcích dosáhnout také vysokých rychlostí deformace. M-TT lze tak díky tomu využít pro studium změny mechanických vlastností v závislosti na rychlosti deformace.



Obr. 126 Makrostruktura svarového spoje a tahové diagramy základních materiálů (BM) [11]



Obr. 127 Průběh tvrdosti HV1 a tahových vlastností napříč svarovým spojem

7. Diskuze výsledků

Hlavním cílem této disertační práce bylo najít závislosti mezi charakteristikami měřenými standardními zkouškami (zkouška tahem, zkouška rázem v ohybu a zkouška lomové houževnatosti) a zkouškami miniaturních (podrozměrných) tělesech. Stěžejní část práce patří nalezení empirických korelací mezi výsledky získanými ze zkoušek SPT a zmíněnými standardními zkouškami. Pro tento účel byly vybrány materiály s celkem 19 různými mikrostrukturními stavy, u kterých byly provedeny zkoušky v rozsahu, který udává **Tab. 2** na str. 55. Pro získání požadovaných výsledků bylo měřeno 45 zkoušek tahem, 121 zkoušek SPT při +20 °C a 15 zkoušek SPT při jiných teplotách, 128 zkoušek rázem v ohybu na tělesech Charpy (včetně podrozměrných těles) pro určení velikostního faktoru při 20°C, 60 zkoušek rázem v ohybu pro určení korelací mezi přechodovými teplotami $FATT_{50}$, 39 zkoušek LH a 12 zkoušek M-TT (36 zkoušek M-TT při uvažování práce [11]). Pro určení závislostí mechanických charakteristik v co největším rozsahu byly vybrány materiály s výrazně odlišnými mechanickými vlastnostmi, kdy se mez pevnosti pohybovala od cca 640 MPa do 1970 MPa. Z hlediska lomového chování se hodnoty lomové houževnatosti J_{IC} pohybovaly v rozmezí od cca 45 MPa.m^{1/2} do 380 MPa.m^{1/2}, hodnoty vrubové houževnatosti KCV od cca 78 J do 277 J a hodnoty $FATT_{50}$ od -39°C do +14 °C (při uvažování s výsledky práce [11] byla horní zkoumaná teplota $FATT_{50} +52$ °C). Na základě metodik popsanych v teoretické části byly zkoumány korelace pro vyšetřované materiály.

Pro zkoumané materiály byla hledána lineární závislost mezi hodnotami ze SPT F_m a F_e a hodnotami ze zkoušek tahem R_m a $R_{p0,2}$. Zde byly možné dva přístupy: korelovat přímo hodnoty F_m a F_e , nebo tyto hodnoty tzv. znormalizovat jako $F_m/(h_0 \cdot u_m)$ a F_e/h_0^2 . Bylo ukázáno, že druhý přístup je vhodnější, neboť kompenzuje problematické korelace z křehkých materiálů a částečně kompenzuje rozdíly v tloušťce SPT těles. Přepočítat zmíněné hodnoty ze SPT na tahové hodnoty lze na základě rovnic (74) a (75). Hodnota spolehlivosti R^2 činí 0,7091 pro přepočet na mez kluzu a 0,9486 pro přepočet na mez pevnosti. Pro určení meze kluzu se tedy SPT jeví jako méně spolehlivá metoda, kdežto mez pevnosti lze určit s poměrně velkou jistotou.

V mnoha případech je při nedostatku materiálu třeba korelovat hodnoty nárazové práce získaných z podrozměrných Charpy těles na tělesa standardní. Tato problematika je diskutována v kapitole 6.3.4.1 na str. 75. Cílem bylo odhadnout, v jakém trendu se mění hodnoty KV se snižujícím se průřezem těles. Pro splnění tohoto cíle bylo měřeno téměř 120 Charpy těles s různým průřezem. Pro zkoumané materiály bylo zjištěno, že hodnota vrubové houževnatosti KCV klesá se snižujícím se průřezem tělesa, ale jen v případě, že lomy u standardních těles jsou 100% houževnaté. Pokud se však vyskytne alespoň částečný křehký lom u standardního tělesa, tento předpoklad přestává platit a trend hodnot KCV již nelze v těchto případech predikovat.

Měření přechodové teploty pomocí SPT a standardních Charpy těles bylo provedeno pro dva materiály (m08 a m15). Byl stanoven koeficient α_{SPT} v rovnici (76). Pro materiál m08 činí jeho hodnota 0,39 a pro m15 činí 0,49. Koeficient α_{SPT} je tedy materiálově závislý parametr a jeho použitelnost se musí pro každý typ materiálu znovu verifikovat. Použitelnost této metody je tak zřejmě limitována jen na určité, sobě navzájem si podobné materiály. Pracnost metody pro určení α_{SPT} je velká a naměřit dostatečné množství dat by bylo velmi finančně i časově náročné.

Pro určení přechodové teploty na materiálech m08 a m15 byly použity také mini-Charpy tělesa. Posun Δt u přechodových teplot $FATT_{50}$ (viz rovnice (9)) činil 63 °C, resp. 72 °C. Pro porovnání dalších materiálů byly vzaty hodnoty z autorovy práce [11] a pro materiály v této práci byl naměřen teplotní posun téměř konstantní a činil 60 (± 2) °C. Na základě těchto měření lze odhadnout, že teplotní posun Δt mezi $FATT_{50}$ měřenou na standardních a podrozměrných Charpy vzorcích bude pro mnoho ocelí konstantní. Proto pro určení přechodové teploty budou mini-Charpy tělesa vhodnější než SPT disky. Jistou roli při zvážení vhodnosti výběru podrozměrných těles pro určení $FATT_{50}$ hraje i fakt, že typ zatěžování je u mini-Charpy těles stejný a proto i nejistota určení korelačních vztahů je z principu menší. Také pracnost je u této metody menší.

Dále byla zkoumána možnost odhadnout lomovou houževnatost na základě SPT. Nejdříve byly naměřeny hodnoty lomové houževnatosti u materiálů m11, m12, m14, m15, m17, m18 a m19 a byla vyhodnocena lomová houževnatost J_{IC} jako referenční hodnota pro korelace ze SPT. Nad to byla u materiálu m19 měřena LH i pro Charpy vzorek, který lze z hlediska lomové mechaniky považovat za podrozměrný. Naměřené výsledky J_{IC} byly ve shodě s tělesy 1T-CT, nicméně tvary J-R křivek se za průsečíkem J_0 již mění v závislosti na geometrii tělesa.

Při měření LH bylo také ukázáno, že hodnoty naměřených charakteristik (J_{IC} dle ASTM E1820 [8], $J_{0.2BL}$ dle ISO 12135 [9]) jsou závislé na tom, podle jaké normy jsou zkoušky vyhodnocovány. Oba parametry sice vyjadřují inženýrsky určenou lomovou houževnatost definovanou jako průsečík J-R křivky a rovnoběžky konstrukční čáry posunutý o 0,2 mm, ale jak bylo ukázáno v kapitole 6.4.5, získané hodnoty LH se v závislosti na použité normě podstatně liší. Pokud by tedy zkoumané materiály byly vyhodnoceny podle jiné normy než ASTM E1820, byly by obdržené koeficienty podstatně odlišné.

Na základě rešerše v teoretické části byla zkoumána lineární závislost mezi hodnotami lomové houževnatosti J_{IC} a hodnotami efektivní lomové deformace ϵ_f . Hodnoty ϵ_f byly stanoveny pomocí metody měření h_f na výbrusu. V rámci měření efektivní lomové deformace ϵ_f bylo též provedeno ověření vztahu (44), který představuje alternativním způsob určení efektivní lomové deformace přímo z grafu, tj. na základě hodnoty u_f (posunutí na ose grafu v místě porušení). Bylo provedeno více než 100 SPT a byly porovnány hodnoty $\ln(u_f/h_0)$ a $\ln(\ln(h_0/h_f))$. Hodnota spolehlivosti R^2 činila 0,9616. Pro výpočet ϵ_f na základě hodnoty u_f lze použít rovnici (78) a dále byl navržen nový vztah (79) používající taktéž hodnotu u_f pro výpočet ϵ_f . Tento vztah se pro dané materiály ukázal být vhodnější.

Oproti jiným pracím nebylo pro vyhodnocení LH použito rozdělení na křehké a houževnaté porušení (rovnice (55) doporučená pro vyhodnocení křehkých materiálů se zde ukázala být nevhodná), ale do aplikovaného korelačního vztahu (tj. lineární závislosti mezi J_{IC} a ϵ_f) byly zahrnuty všechny materiály, tedy i materiály porušující se křehce. Koeficienty v rovnici (53) byly stanoveny na: $k_{SP} = 267,2$, $J_0 = -1,5$ a korelační vztah pro zkoumané materiály je uveden rovnici (80). Ačkoli hodnota spolehlivosti R^2 činí 0,9616, nelze tuto korelaci považovat za obecně platnou. Jedním z důvodů je to, že v literatuře jsou koeficienty k_{SP} a J_0 uváděny s jinými hodnotami a často velmi odlišnými. Proto se tyto koeficienty musí brát jako materiálově závislé a pro každý nový typ materiálu se musí platnost koeficientů ověřit, případně nalézt jiné koeficienty, platné pro daný typ materiálu. Navíc některé výzkumy nasvědčují tomu, že koeficienty jsou závislé i na laboratoři, v níž jsou měření prováděna [77][78]. Nicméně pro podobné typy materiálů lze získaný korelační vztah s velkou pravděpodobností použít.

Ve snaze snížit nejistotu korelací ze SPT na tahové vlastnosti bylo navrženo mikro-tahové těleso. Základní geometrie tohoto tělesa vychází z velikosti SPT disku a tudíž je možno z již existujících SPT disků vyrobit mikro-tahové těleso (např. v případech, kdy SPT disky slouží jako svědečné vzorky v jaderných elektrárnách). U tohoto tělesa je diskutována jeho použitelnost a první naměřené výsledky jsou v dobré shodě se standardními tahovými tělesy, a to bez nutnosti empirické korelace. S naměřenými záznamy lze pracovat stejně jako se záznamy ze standardní zkoušky tahem, tedy vykreslit standardní tahový diagram v souřadnicích napětí-poměrná deformace a ve shodě s normou ČSN EN ISO 6892-1 [14] vyhodnotit obvyklé charakteristiky, tedy mez pevnosti, mez kluzu a navíc, v porovnání se zkouškou SPT, také tažnost a kontrakci. Pro přesné vyhodnocení meze kluzu je třeba použít optické měření deformace tělesa. V rámci optických metod se nejvíce osvědčilo měření pomocí bezkontaktního měřicího systému ARAMIS.

8. Závěr

V rámci této disertační práce byla hodnocena kompatibilita výsledků mechanických vlastností materiálů měřených na standardních a podrozměrných (miniaturních) tělesech. Diskutovanými standardními zkouškami byly zkoušky tahem, zkoušky rázem v ohybu a zkoušky lomové houževnatosti. U těchto zkoušek byly vyhodnocovány tyto materiálové charakteristiky: R_m , $R_{p0,2}$, A , Z , KV , KCV , $FATT_{50}$, K_{IC} a J_{IC} .

Na 19 materiálech bylo celkem naměřeno 45 zkoušek tahem, 121 zkoušek SPT při +20 °C a 15 zkoušek SPT při jiných teplotách, 128 zkoušek rázem v ohybu na tělesech Charpy při 20°C, 60 zkoušek rázem v ohybu pro určení teploty $FATT_{50}$, 39 zkoušek LH a 12 zkoušek M-TT (36 zkoušek M-TT při uvažování práce [11]). Pro sledované materiály se mez pevnosti pohybovala od cca 640 MPa do 1970 MPa, hodnoty lomové houževnatosti J_{IC} se pohybovaly v rozmezí od cca 45 MPa.m^{1/2} do 380 MPa.m^{1/2}, hodnoty vrubové houževnatosti KCV od cca 78 J do 277 J a hodnoty $FATT_{50}$ od -39°C do +14 °C (při uvažování s výsledky práce [11] byla horní zkoumaná teplota $FATT_{50}$ +52 °C).

Výsledky naměřených hodnot sledovaných materiálů prokázaly, že na základě zkoušky SPT je možné (po stanovení korelačních vztahů pro daný typ materiálu) vyhodnotit tyto materiálové charakteristiky:

- mez pevnosti
- mez kluzu
- lomovou houževnatost
- přechodovou teplotu $FATT_{50}$

Vyhodnocení meze pevnosti se jeví spolehlivé ve většině případů, ale vyhodnocení meze kluzu lze určit s mnohem menší spolehlivostí.

Obdržení korelační vztah pro vyhodnocení lomové houževnatosti na základě SPT lze použít pro křehké i houževnaté porušení, nicméně (navzdory vysoké hodnotě spolehlivosti $R^2=0,9616$), nelze tuto korelaci považovat za obecně platnou, neboť se v literatuře objevují vztahy s odlišnými koeficienty.

Pro přepočítání z teploty T_{SP} na teplotu $FATT_{50}$ byly určeny koeficienty, které (přesto, že se pohybují v rozmezí hodnot publikovaných v literatuře) se jeví být materiálově závislé a na jiné materiály obtížně přenositelné a použitelné.

Byla verifikována použitelnost Charpy tělesa pro měření J_{IC} (z hlediska lomové mechaniky lze toto těleso pro tvárné materiály považovat za podrozměrné), dále použitelnost mini-Charpy těles pro měření přechodové teploty $FATT_{50}$ a pro měření tahových vlastností byla navržena jak geometrie mikro-tahového tělesa (na základě SPT disku), tak metodika zkoušení M-TT.

Výsledky měření na zmíněných podrozměrných (miniaturních) tělesech lze shrnout do těchto závěrů:

- Naměřené výsledky J_{IC} na Charpy tělese metodou UC byly ve shodě s tělesy 1T-CT. J-R křivka pro těleso Charpy SE(B) se však začíná odklánět od J-R křivky pro CT vzorek při cca 0,5 mm stabilního nárůstu trhliny a pro větší nárůsty trhlin jsou sklony křivek pro obě geometrie zřetelně odlišné.
- Výsledky na mini-Charpy tělesech použitých pro vyhodnocení tranzitní teploty $FATT_{50}$ vykazovaly menší rozptyl teplotního posunu Δt než v případě zkoušek SPT koeficient α_{SPT} . V autorově práci [11] byl pro 5 materiálů stejnou metodikou naměřen teplotní posun

téměř konstantní ($60 (\pm 2) ^\circ\text{C}$) a univerzální použitelnost této metody pro určení *FATT*₅₀ se jeví velmi nadějně.

- Hodnota vrubové houževnatosti *KCV* klesá se snižujícím se průřezem tělesa, ale jen v případě, že lomy u standardních těles jsou 100% houževnaté. Pokud se však vyskytne alespoň částečný křehký lom u standardního tělesa, tento předpoklad přestává platit a trend hodnot *KCV* již nelze v těchto případech predikovat.
- Bylo úspěšně vyzkoušeno nově navržené těleso na základě velikosti SPT disku pro M-TT. Toto těleso lze vyrobit z již existujících SPT disků, které mohou sloužit např. jako svědečné vzorky.
- Z M-TT lze určit všechny charakteristiky vyhodnocované ze zkoušek tahem (*R_m*, *R_{p0,2}*, *A*, *Z*) a při použití optického měření deformace v průběhu testu (např. ARAMIS) je získaný záznam srovnatelný se záznamy ze zkoušek tahem na standardních tělesech.
- M-TT lze např. použít pro určení anizotropie tenkostěnných trubek nebo pro měření lokálních vlastností z různých (kritických) míst provozovaných součástí. Jako příklad byla naměřena distribuce tahové pevnosti a tažnosti napříč svarem.

Obdržené korelační vztahy ze SPT nelze brát jako materiálové konstanty a použití každého typově nového materiálu je třeba verifikovat. Nicméně, použité typy korelačních vztahů mohou být využity při dalším pokračování zkoumání v této oblasti. Nevýhoda SPT je nutnost přepočtu naměřených hodnot na standardní charakteristiky pomocí empirických korelací, což obnáší vytvoření databáze pro zkoumané typy materiálů.

Naopak velice vhodné se ukázalo (při nedostatku experimentálního materiálu) pro vyhodnocení přechodové teploty použít mini-Charpy vzorek, který je zatěžován podobně jako standardní těleso a teplotní posun *FATT*₅₀ mezi oběma geometriemi vykazuje větší spolehlivost než v případě SPT. Výsledky ze zkoušek M-TT dokonce nemusí již být nijak korelovány a mají pravděpodobně univerzální platnost pro všechny konstrukční materiály.

Pro další pokračování prací vyhodnocující mechanické charakteristiky z malého objemu experimentálního materiálu se jeví vhodné zaměřit se na miniaturizovaná zkušební tělesa, která budou svým charakterem odpovídat způsobu zatěžování standardních těles, a to nejen v popisovaných oblastech mechanického zkoušení, ale i v jiných oblastech měření mechanických vlastností, jako jsou např. creepové či únavové testy.

Seznam použité literatury:

- [1] Ptáček, L. a kol.: Nauka o materiálu I. CERM, Brno, 2001, ISBN 80 -7204 – 193 – 2
- [2] Assessment of component material properties, [online], [cit. 2013-08-09], <http://www.dnvkema.com/de/services/ces/ri/spt.aspx>
- [3] Hurst, R., Matocha, K. The European Code of Practice for Small Punch Testing, The 1st International Conference SSTT, 2010, ISBN 978-80-254-7994-0, p. 5-11
- [4] Tylšav, S., Rusz, S., Influence of changes deformation on structure AlMn1Cu alloy with use SPD process, conference Metal, 18.-20.5.2011
- [5] Roberts, P.R. Material Sampling from Components within the Nuclear Industry and the Extraction of Useful Materials Information, The 1st International Conference SSTT, 2010, ISBN 978-80-254-7994-0, p.19-24
- [6] Kobe Material Testing Laboratory Group, On-Site Sampling using EDSE, [online], [cit. 2014-01-24] http://www.kmtl.co.jp/eng/business_field/EDSE_work.html
- [7] ETD Technology Newsletter, EDSE: Innovation for Asset Management [online], [cit. 2014-01-24]: <http://www.etc-consulting.com/app/download/5791870938/ETD+Newsletter+Ocb+13.pdf>
- [8] ASTM Standard E 1820 – 09, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, 2009
- [9] ISO Standard 12135, Unified Method of Test for the Determination of Quasistatic Fracture Toughness, Geneva, Switzerland, 2002
- [10] CEN Workshop Agreement, Small Punch Test Method for Metallic Materials, CWA 15627:2007, December 2007
- [11] Konopík, P., Džugan, J, Procházka, R., Evaluation of Local Mechanical Properties of Steel Weld by Miniature Testing Technique, Proceedings of Materials Science and Technology (MS&T) 2013, 27.-31.1 2013, Montreal, Canada, ISBN: 978-0-87339-762-9
- [12] Mechanické zkoušení kovů - teoretická část, [online], prosinec 2002, [cit. 2011-08-09], http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_mechanicke_zkouseni/teorie.htm
- [13] Plastická deformace a pevnost, [online], [cit. 2011-08-10], Ústav fyziky materiálů Akademie věd České republiky, [online], [cit. 2011-08-28] www.ipm.cz/group/fracture/vyuka/doc/P04.ppt
- [14] ČSN EN ISO 6892-1: Kovové materiály – zkoušením tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty, únor 2010
- [15] ČSN EN 10002-1: Kovové materiály. Zkouška tahem. Část 1: Zkouška tahem za okolní teploty, prosinec 1994
- [16] Stránský, L., Mollíková, E., Sedláček, J. Zkouška tahem, Vysoké učení technické v Brně, [online], [cit. 2011-08-09], <http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/Tahovka.pdf>
- [17] Skálová, J., Kovařík, R., Benedikt, V., Základní zkoušky kovových materiálů, ZČU Plzeň, 3. vydání, ISBN 80 – 7082 – 623 – 1
- [18] Mollíková, E., Kaláb, P. Stránský, L., Sedláček, J., Zkouška rázem v ohybu [online], [cit. 2011-08-21] <http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/umvi/zk.raz.ohybu.pdf>
- [19] ČSN ISO 148-1: Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy - Část 1: Zkušební metoda
- [20] ČSN EN 10045-1 Kovové materiály – Zkouška rázem podle Charpyho – Část 1: Zkušební metoda (U a V vruby) (červen 1998)
- [21] ČSN EN ISO 14556: Ocel – Zkouška rázem v ohybu na kyvadlovém kladivu tyčí Charpy s V-vrubem – Instrumentovaná zkušební metoda, červen 2001

- [22] Mentl, V. Problematika křehkého lomu, Podkladové materiály pro výuku strojírenských materiálů na ZČU, 2003
- [23] Vlach, B. Zkoušky odolnosti ocelí proti křehkému lomu, tranzitní teploty [online], [cit. 2011-08-14]. Ústav Materiálových Věd a Inženýrství. [online], [cit. 2011-08-28] <http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/GS0/05%20-%20Mereni%20TLCH.doc>
- [24] M. P. Manahan and C. Charles, "A Generalized Methodology for Obtaining Quantitative Charpy Data from Test Specimens of Nonstandard Dimensions," Nucl., Technol. 90, 245-59 (May 1990)
- [25] Karel Matocha , Bohumír Strnadel, Hodnocení vrubové houževnatosti pomocí malých nestandardizovaných zkušebních těles [online], [cit. 2013-06-14] http://www.metal2013.com/files/proceedings/metal_07/Lists/Papers/184.pdf
- [26] Zkouška rázem v ohybu [online], [cit. 2011-08-28] <http://ime.fme.vutbr.cz/.../ZKOUSKA%20RAZEM%20V%20OHYBU.doc>
- [27] Knésl, Z., Dvoupřímá lomová mechanika a některé její aplikace, Vysoké učení technické v Brně, Brno, 2000, ISBN 80-214-1580-0
- [28] Kunz, J., Základy lomové mechaniky, 3. přepracované vydání, Praha : ČVÚT, 2000. 260 s. ISBN 80-01-02248-X.
- [29] Vlk, M., Florian, Z., Mezní stavy a spolehlivost, Ústav mechaniky těles, Brno 2007, [online], [cit. 2011-08-28] www.zam.fme.vutbr.cz/~vlk/meznistavy.pdf
- [30] Jones, D.R.H.: Engineering Materials 3, Materials Failure Analysis, Pergamon Press, 1993, ISBN 0 08 0419046B. [online], [cit. 2011-08-28] www.zam.fme.vutbr.cz/~vlach/6ms%5Czivot%5CComet.doc
- [31] http://en.wikipedia.org/wiki/Fracture_mechanics [online], [cit. 2011-08-28]
- [32] Historie velkých havárií a vývoj v oblasti zkoušení materiálů, Skupina křehkého lomu, ÚFM AV ČR, v.v.i. [online], [cit. 2011-08-28] <http://www.ipm.cz/group/fracture/vyuka/doc/P01.pdf>
- [33] Vlach, B. Základy lomové mechaniky [online], 2001, [cit. 2011-08-12]. Ústav Materiálových Věd a Inženýrství. [online], [cit. 2011-08-28] <http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/GS0/06%20-%20Lomova%20mechanika.doc>
- [34] Podkladové materiály pro výuku, Lomová mechanika, Vysoké učení technické v Brně, [online], [cit. 2011-08-28] http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/GS0-K/05_MS6K.ppt
- [35] Hutař, P., Náhlík, L., Lineárně elastická lomová mechanika, K-koncepce [online], [cit. 2011-08-28] <http://student.chytrak.cz/unava/09%20K-koncepce.pdf>
- [36] Anderson, T.L., Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications, Florida, USA: CRC Press, 1995, 688s, ISBN 0-8493-8974-7
- [37] Růžička, M., Jurenka, J., Hrubý, Z., Dynamická pevnost a životnost, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, [online], [cit. 2011-08-28] http://mechanika.fs.cvut.cz/content/files/DPZ/DPZ_Jur04.pdf
- [38] Eshelby, J. D., Stress Analysis of Cracks. ISI Publication, 121, 1968, p.13-48
- [39] Rice, J. R., A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of strain Concentration by Notches and Cracks. J. Appl. Mech., 35, 1968, p.379-386
- [40] Rice, J. R., Mathematical Analysis in the Mechanics of Fracture. In: Fracture. Academic Press 1968, p. 191-311
- [41] Kunz, J., Aplikovaná lomová mechanika, 4. přepracované vydání, Praha: ČVÚT, 2005. 272 s. ISBN 80-01-03306-6,
- [42] Vlach, B. Elasticko-plastická lomová mechanika 2001, Ústav Materiálových Věd a Inženýrství, [online], [cit. 2010-08-24] <http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/.../07%20-%20Mereni%20-%20LM.doc>

- [43] Matocha, K., Filip, M. Hodnocení aktuálních křehkolomových vlastností energetických zařízení pomocí penetračních testů, *Koroze a ochrana materiálu*, 2007
- [44] Balák, M., Březina, M., Rapantová, Z., Mass-production of SPT specimen, The 1st International Conference SSTT, 2010, ISBN 978-80-254-7994-0, p.87
- [45] Hurst, R., Matocha, K. The European Code of Practice for Small Punch Testing, The 1st International Conference SSTT, 2010, ISBN 978-80-254-7994-0, p. 5-11
- [46] Purmenský, J., Matocha, K. Zkoušení pomocí malých vzorků ve fyzikální metalurgii, konference Metal, 15.-17.5. 2001
- [47] Manahan, M., Argon, A., Harling, O., The development of a miniaturized disk bend test for the determination of post-irradiation mechanical properties, *Journal of Nuclear Materials*, 1981, p.1545-1550
- [48] Mao, X., Saito, M., Takahashi, H., Small Punch Test to predict ductile fracture toughness J_{IC} and brittle fracture toughness K_{IC} , *Scripta Metallurgica et Materialia*, 1991, p.2481-2485
- [49] Foulds, J.R., Woytowicz, P.J., Fracture Toughness by Small Punch Testing, *Journal of Testing and Evaluation*, 1995, p.3-10
- [50] Kupča, L., Václavková, J., Application of the Small Punch Test Methods for The Mechanical Properties Evaluation, konference Metal, 15.-17.5. 2001
- [51] Du, P., Ling, X., Zhou, Z., Study of Influence Factor of Small Punch Test to Estimate the Yield Strength by Energy Method, The 1st International Conference SSTT, 2010, ISBN 978-80-254-7994-0, p.133-137
- [52] WANG, Z.-X. et al.: Small Punch Testing for Assessing The Fracture Properties of The Reactor Vessel Steel With Different Thicknesses, *Nuclear Engineering and Design*, Volume 238, Issue 12, December 2008, p. 3186-3193
- [53] Li, Y., Hurst, R., New Approach to Determine Fracture Toughness from the Small Punch Test, The 1st International Conference SSTT, 2010, ISBN 978-80-254-7994-0, p.94-102
- [54] Buloch, J., H., A Study Concerning Material Fracture Toughness and Some Small Punch Test Data for Low Alloy Steels, *Engineering Failure Analysis* 11, 2004
- [55] Matocha, K., Purmenský, J., Non Destructive Evaluation of Mechanical Characteristics of In - service Components' Materials by Small Punch Tests, *NDT for Safety*, November 07-09, 2007, Prague, Czech Republic
- [56] Purmenský, J., Matocha, K., Zkoušení pomocí malých vzorků ve fyzikální metalurgii, *METAL* 2001, 15. - 17. 5. 2001, Ostrava, Czech Republic
- [57] Okada, A., Yoshie, Y., Kojima, S., Abe, K., Kiritani, M.: Correlation Among a Variety of Miniaturized Mechanical Tests and Their Application to D-T Neutron-Irradiated Metals. *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 133 + 134 (1985), s.321
- [58] Lacale, R., Alvarez, J., Small Punch Testing for Tensile and Fracture Behavior, The 1st International Conference SSTT, 2010, ISBN 978-80-254-7994-0, p.59-68
- [59] Klevtsov I., Dedov A., Molodtsov A., Using of Small Punch Test for Determination of Tensile Properties for Power Plant Steels, 6th International DAAAM Baltic Conference Industrial Engineering 24-26 April 2008, Tallinn, Estonia
- [60] Song, S., H., Faulkner, R., G., Marny, P., Small Punch Test Evaluation of Neutron-Irradiation-Induced Embrittlement of Cr-Mo Low-Alloy Steel, *Materials Characterization* 53, 2004, p.35-41
- [61] Ruan, Y., Spatig, P., Victoria, M. Assessment of mechanical properties of the martensitic steel EUROFER97 by means of punch tests, *Journal of Nuclear Materials*, 2002, p.307-311

- [62] Kristofory, F., Mikuláš, D., Kander, L., Evaluation of Mechanical Properties And Wear Resistant of Electrodeposited Composite Coatings With Nano-size Particles, Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava číslo 1, 2006, ročník LII, řada strojní, článek č. 1508
- [63] Matocha, K., Kuboň, Z., Ductile-brittle Transition Behavior of Circumferential Weld of Reheater Header Determined by Small Punch Test, The 1st International Conference SSTT, 2010, ISBN 978-80-254-7994-0, p.103-107
- [64] GAI X., SATO Y.S., KOKAWA H., ICHIKAWA K., Ductile - brittle Transition of Steel Electron Beam Weld, Metal in Small Punch Test. Science and Technology of Welding and Joining, 2002, Vol.7, No.4, p. 204.
- [65] Kander, L., Filip, M., Hodnocení materiálových vlastností kotlového tělesa po dlouhodobém provozu metodou malých vzorků, METAL 2006, 23.-25.5.2006, Hradec nad Moravicí
- [66] Li, Y., Vulpen, R., Comparison with Fracture Toughness Derived from Charpy-V and Small Punch Tests, The 2st International Conference SSTT, 2012, ISBN 978-80-260-0079-2, p.210
- [67] Buloch, J., H., Toughness Losses In Low Alloy Steels at High Temperatures: An Appraisal of Certain Factors Concerning The Small Punch Test, International Journal of Pressure Vessels and Piping 75, 1998, p. 791-804
- [68] Saucedo-Munoz, M.L. et al.: Correlation between JIC and equivalent fracture strain determined by small-punch tests in JN1 JJ1 and JK2 austenitic stainless steels, Cryogenics 41 (2001), p. 913-719.
- [69] Shindo, Z. - Zamaguchi, Z. – Horiguchi, K.: Small punch testing for determining the cryogenic fracture properties of 304 and 316 austenitic stainless steels in a high magnetic field, Cryogenics, Volume 44, Issue 11, November 2004, p. 789-792.
- [70] 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 2sd International Conference SSTT, 2012, ISBN 978-80-260-0079-2, p. 325
- [71] Sokolov, M., A., Nanstad R. K., On impact testing of subsize charpy v-notch type specimens, Effects of Radiation on Materials, 17th International Symposium, p406, August 1996, ISBN: 0-8031-2016-8, ISSN: 1050-7515
- [72] ASTM Standard E 399 – 90, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, 1990
- [73] Džugan, J, Corrected Procedure for Crack Length Calculation by the Unloading Compliance Technique for Charpy-sized Specimens, Journal of Testing and Evaluation, Nov. 2005
- [74] Konopík, P, Viehrig, H. W., Fracture Toughness Characterization of the Martensitic Chromium Steel P91, Comat 2012, Plzeň, ISBN: 978-80-87294-34-5
- [75] Procházka, R., Měření mechanických vlastností konstrukčních materiálů pomocí miniaturních zkušebních vzorků, Diplomová práce, ZČU Plzeň, 2013
- [76] GOM: ARAMIS System. [[online], [cit. 2013-08-28] <http://www.gom.com/3d-software/aramis-software.html>
- [77] Matocha, K.:The Evaluation of Circumferential Weld of Reheater Header by Small Punch Tests, COMAT 2010, Plzeň, pp. 91-92 + CD, ISBN 978-80-254-8683-2.
- [78] Výsledky prezentované na ASTM symposium The Sixth International Symposium on Small Specimen Test Techniques, January 29-31, 2014, Houston

Seznam obrázků

Obr. 1 Grafické vyjádření hodnot naměřených pomocí SPT a miniaturních těles korelovaných na materiálové charakteristice naměřené na standardních tělesech.....	13
Obr. 2 Základní typy tahových diagramů [16]	15
Obr. 3 Příklad zkušební tělesa pro zkoušku tahem [16]	15
Obr. 4 Vyhodnocení smluvní meze kluzu [13]	16
Obr. 5 Dolní a horní meze kluzu [13]	16
Obr. 6 Uspořádání zkoušky rázem v ohybu metodou Charpy [20]	19
Obr. 7 Geometrie zkušební tělesa pro zkoušky rázem v ohybu metodou Charpy – V vrub.....	19
Obr. 8 Geometrie mini-Charpy tělesa pro zkoušky rázem v ohybu	20
Obr. 9 Průběh napětí ve zkušebním Charpy tělese [17]	20
Obr. 10 Způsob vyhodnocení křehkého lomu z lomové plochy [23]	21
Obr. 11 Příklad určení přechodové teploty $FATT_{50}$	22
Obr. 12 Odlišné případy chování dvou různých ocelí, které vykazují stejné hodnoty KV [22]	22
Obr. 13 Stanovení charakteristických hodnot síly při zkoušce rázem v ohybu [21]	23
Obr. 14 a) Křehký lom celosvařovaného trupu lodí Liberty [31].....	25
Obr. 15 Přerozdělení napětí před čelem trhliny v důsledku vytvoření plastické zóny [22].....	27
Obr. 16 Módy pro různá zatížení těles s trhlinou [35]	29
Obr. 17 Zatěžovaný vzorek a reálná konstrukce se stejnou hodnotou K_I [36]	29
Obr. 18 Vliv tloušťky součásti na hodnotu lomové houževnatosti K_C [34]	30
Obr. 19 Prostorové znázornění plastické zóny na čele trhliny [29].....	30
Obr. 20 Integrační oblasti pro výpočet J-integrálu [35]	31
Obr. 21 Těleso zatížené tříbodovým ohybem (SE(B) specimen) [8]	33
Obr. 22 Těleso zatížené excentrickým tahem (CT - Compact tension specimen) [8]	33
Obr. 23 Uspořádání zkoušky lomové houževnatosti	34
Obr. 24 Typy závislosti zátěžné síly F na posuvu v [1]	35
Obr. 25 Měření délky trhliny zkušební tělesa po zkoušce LH [28].....	36
Obr. 26 Záznam síla-posunutí rozdělený na elastickou a plastickou část [29].....	37
Obr. 27 Konstrukce J-R křivky s vyhodnocením bodu J_Q [8]	38
Obr. 28 Princip určení J-R křivky na jednom tělese pomocí měření změny poddajnosti [42].....	39
Obr. 29 Schematické znázornění odběru vzorků pomocí zařízení SSamTM-2 [5]	40
Obr. 30 Odběrové zařízení SSamTM-2 [5]	40
Obr. 31 Princip odběru vzorku materiálu pomocí odběrového zařízení SSamTM-2 [5].....	41
Obr. 32 Disky pro testy SPT odebrané ze zkušební materiálu [44].....	41
Obr. 33 Odběrové zařízení EDSE, odebraný vzorek a z něj vyrobitelná miniaturní tělesa [7]	42
Obr. 34 a) Odebraný vzorek pomocí EDSE b) Hloubka ovlivněné vrstvy	42
Obr. 35 Přípravek pro zkoušky SPT.....	44
Obr. 36 Schéma uspořádání SPT.....	44
Obr. 37 Zkušební disk používaný pro zkoušky SPT	45
Obr. 38 Záznam SPT pro nízkouhlikovou ocel	45
Obr. 39 Charakteristický záznam pro SPT s vyznačenými body pro vyhodnocení [10]	46
Obr. 40 Experimentální křivka $F(u)$ a proložená bilineární funkce $f(u)$ [10]	47
Obr. 41 Alternativní přístup vyhodnocení F_e [51]	47
Obr. 42 Schéma postupu měření nejmenší tloušťky po zkoušce SPT [10]	48
Obr. 43 Vzorek z materiálu 16 363 porušený při pokojové teplotě	48
Obr. 44 Vztah mezi $\ln(h_0/h_f)$ a $\ln(u_f/h_0)$ pro rotorovou CrMoV ocel [55]	49
Obr. 45 Korelace mezi mezí kluzu a zatížením F_e u SPT [55].....	50
Obr. 46 Korelace meze pevnosti na normalizované maximální síle při SPT [62].....	51
Obr. 47 Příklad chování materiálu při SPT za různých teplot [67]	52
Obr. 48 Posun tranzitní teploty pro ocel vyhodnocené ze SPT a ze standardních Charpy těles 10x10x55 mm užitím metody $FATT_{50}$ [55]	52
Obr. 49 Závislost meze kluzu na normalizované síle F_e (vlevo) a závislost meze pevnosti na normalizované maximální síle ze SPT (vpravo) dle práce [70]	54
Obr. 50 Geometrie zkušebních tyčí pro zkoušku tahem.....	58
Obr. 51 Vlevo: Servohydraulický univerzální zkušební stroj MTS 810	59

Obr. 52	Reprezentativní záznamy zkoušky tahem pro materiály m1 – m10.....	60
Obr. 53	Reprezentativní záznamy zkoušky tahem pro materiály m11 – m19.....	60
Obr. 54	Grafické znázornění meze kluzu a meze pevnosti pro sledované materiály	61
Obr. 55	Grafické znázornění tažnosti a kontrakce pro sledované materiály	61
Obr. 56	Vlevo: Kladivo – 300J, vpravo: kladivo 15 J.....	62
Obr. 57	Instrumentované záznamy za zkoušek rázem v ohybu, materiál m06, 20°C	66
Obr. 58	Instrumentované záznamy za zkoušek rázem v ohybu, materiál m08, 20°C	67
Obr. 59	Instrumentované záznamy za zkoušek rázem v ohybu, materiál m11, 20°C	67
Obr. 60	Instrumentované záznamy za zkoušek rázem v ohybu, materiál m15, 20°C	68
Obr. 61	Instrumentované záznamy za zkoušek rázem v ohybu, materiál m08, 10x10 mm	69
Obr. 62	Instrumentované záznamy za zkoušek rázem v ohybu, materiál m08, 3x4 mm	69
Obr. 63	Instrumentované záznamy za zkoušek rázem v ohybu, materiál m15, 10x10 mm	70
Obr. 64	Instrumentované záznamy za zkoušek rázem v ohybu, materiál m15, 3x4 mm	70
Obr. 65	Přechodová křivka vyhodnocená z instrumentovaných záznamů, m08_10x10	73
Obr. 66	Přechodová křivka vyhodnocená z instrumentovaných záznamů, m08_3x4	73
Obr. 67	Přechodová křivka vyhodnocená z instrumentovaných záznamů, m15_10x10	74
Obr. 68	Přechodová křivka vyhodnocená z instrumentovaných záznamů, m15_3x4	74
Obr. 69	Závislost výsledků KCV na průřezu pod vrubem, m06, +20°C	76
Obr. 70	Závislost výsledků KCV na průřezu pod vrubem, m08, +20°C	77
Obr. 71	Závislost výsledků KCV na průřezu pod vrubem, m11, +20°C	77
Obr. 72	Závislost výsledků KCV na průřezu pod vrubem, m15, +20°C	78
Obr. 73	Závislost výsledků KCV na průřezu pod vrubem pro všechny materiály, +20°C	78
Obr. 74	Závislost výsledků KCV na průřezu pod vrubem vyjádřená v %, +20°C	79
Obr. 75	Závislost hodnoty KCV na průřezu pod vrubem pro materiál m08 v příčném směru s uvedením křehkého podílu lomu pro testovanou geometrii Charpy těles.....	79
Obr. 76	Geometrie CT tělesa pro zkoušky lomové houževnatosti	81
Obr. 77	Těleso zatížené třibodovým ohybem (SE(B) vzorek)	82
Obr. 78	Značení odběru zkušebních těles pro obdélníkový a kulatý polotovar pro měření lomové houževnatosti [72]	82
Obr. 79	Měřicí sestava pro měření lomové houževnatosti třibodovým ohybem.....	83
Obr. 80	Postup při zabarvování těles a křehkém dolomení po zkoušce LH.....	83
Obr. 81	Ukázka obarveného tělesa po zkoušce LH, m11_1_09.....	84
Obr. 82	Záznamy testů lomové houževnatosti, materiál m11, 20°C	84
Obr. 83	Záznamy testů lomové houževnatosti, materiál m12, 20°C	85
Obr. 84	Záznamy testů lomové houževnatosti, materiál m15, 20°C	85
Obr. 85	Záznamy testů lomové houževnatosti, materiál m14, 20°C	86
Obr. 86	J-R křivka pro materiál m11, 20°C	86
Obr. 87	J-R křivka pro materiál m12, 20°C	87
Obr. 88	J-R křivka pro materiál m15, 20°C	87
Obr. 89	Měřicí sestava pro zkoušky LH; vlevo: COMTES, těleso 1T-CT; uprostřed: HZDR Drážďany, těleso 1T-CT; vpravo: HZDR Drážďany, těleso S(E)B Charpy.....	89
Obr. 90	Tělesa použitá pro zkoušky lomové houževnatosti v HZDR (Drážďany)	90
Obr. 91	Příklad záznamu měření zkoušek lomové houževnatosti, m17_1	91
Obr. 92	Záznamy měření zkoušek lomové houževnatosti, m18, 20°C	92
Obr. 93	J-R křivky, 20°C, materiál m17, tělesa 1T-CT	92
Obr. 94	J-R křivky, 20°C, materiál m19, tělesa 1T-CT a Charpy SE(B)	93
Obr. 95	Porovnání J-R křivek v závislosti na použité normě pro vzorek m19-CT_02, 20°C	95
Obr. 96	Porovnání J-R křivek v závislosti na použité normě pro vzorek m19-Charpy_02, 20°C.....	96
Obr. 97	Přípravek pro zkoušky SPT.....	97
Obr. 98	Schéma uspořádání SPT; vlevo: Testovací stroj, vpravo: detail zkoušky	97
Obr. 99	Ukázka vyhodnocení záznamu SPT na zkušebním disku m08_1	98
Obr. 100	Reprezentativní záznamy SPT pro materiály m01 – m10	99
Obr. 101	Reprezentativní záznamy SPT pro materiály m11 – m19	100
Obr. 102	Příklad měření neuzšího místa po zkoušce, vzorek m12_5 (vlevo) a m14_7 (vpravo).....	100
Obr. 103	SPT záznamy pro materiál m14 s vyznačenými oblastmi porušení 1 a 2	101
Obr. 104	Porušení disku pro oblast 1 – první pokles síly.....	101
Obr. 105	Porušení disku pro oblast 2 – v blízkosti konce záznamů	101

Obr. 106	Uspořádání testu SPT pro teploty do -196 °C; a) Komora do -130 °C, b) přípravek v lázni tekutého dusíku, c) měření teploty během testu	106
Obr. 107	Změny křivek SPT pro různé teploty zkoušek, materiál m15	107
Obr. 108	SPT přechodové křivky a jejich srovnání s $FATT_{50}$ měřených na vzorcích 10x10x55 mm a 3x4x27 mm, materiál m08	108
Obr. 109	SPT přechodové křivky a jejich srovnání s $FATT_{50}$ měřených na vzorcích 10x10x55 mm a 3x4x27 mm, materiál m15	109
Obr. 110	Závislost meze pevnosti na maximální síle	110
Obr. 111	Závislost meze pevnosti na normalizované maximální síle F_m ze SPT	111
Obr. 112	Závislost meze kluzu na normalizované síle F_e ze SPT	111
Obr. 113	Závislost meze kluzu na normalizované síle F_e ze SPT, korelační přímka prochází nulovou souřadnicí obou os	112
Obr. 114	Závislost mezi $\ln(\ln(h_0/h_f))$ a $\ln(u_f/h_0)$ pro materiály m08-m19	114
Obr. 115	Závislost efektivní lomové deformace ε_f na lomové houževnatosti J_{IC}	115
Obr. 116	a) Mikro-tahové těleso, b) porovnání se standardním tělesem, c) model čelistí navržených pro uchycení mikro-tahového tělesa do zkušebního stroje	116
Obr. 117	Rozložení napětí v M-TT tělese při maximálním zatížení [75]	117
Obr. 118	Dva možné způsoby chycení extenzometru na čelisti	117
Obr. 119	Záznamy M-TT spolu se záznamy standardní zkoušky tahem pro materiály m08, m15-m18	118
Obr. 120	Záznamy M-TT_m15_1 a standardního tahového testu m15_1, ukázka vyhodnocení meze kluzu	119
Obr. 121	Příklad vyhodnocení tažnosti ze záznamu M-TT_m15_1	119
Obr. 122	Příklad vyhodnocení tažnosti a kontrakce na stereomikroskopu	120
Obr. 123	Videoextenzometr (vlevo nahoře) a ARAMIS pro měření deformací M-TT	121
Obr. 124	Průběh zkoušky M-TT zachycená systémem ARAMIS	122
Obr. 125	Porovnání záznamů ze standardní zkoušky tahem a M-TT měřené optickými metodami	122
Obr. 126	Makrostruktura svarového spoje a tahové diagramy základních materiálů (BM) [11]	123
Obr. 127	Průběh tvrdosti HV1 a tahových vlastností napříč svarovým spojem	123

Seznam tabulek

Tab. 1 Charakteristické rozměry přípravku a zkušebního disku pro zkoušky SPT	44
Tab. 2 Přehled provedených zkoušek	55
Tab. 3 Chemické složení materiálu steel 1	56
Tab. 4 Chemické složení materiálu steel 2	56
Tab. 5 Chemické složení materiálu steel 3	56
Tab. 6 Chemické složení materiálu MoNiCr	56
Tab. 7 Chemické složení materiálu steel 4	57
Tab. 8 Chemické složení materiálu 34 CrNiMo6	57
Tab. 9 Chemické složení materiálu P91	57
Tab. 10. Výsledky zkoušky tahem	59
Tab. 11 Výsledky zkoušek rázem v ohybu dle Charpyho, materiál m06, 20°C	63
Tab. 12 Výsledky zkoušek rázem v ohybu dle Charpyho, materiál m08, 20°C	64
Tab. 13 Výsledky zkoušek rázem v ohybu dle Charpyho, materiál m11, 20°C	65
Tab. 14 Výsledky zkoušek rázem v ohybu dle Charpyho, materiál m15, 20°C	66
Tab. 15 Výsledky zkoušek rázem v ohybu dle Charpyho, materiál m08, 10x10 mm	71
Tab. 16 Výsledky zkoušek rázem v ohybu dle Charpyho, materiál m08, 3x4 mm	71
Tab. 17 Výsledky zkoušek rázem v ohybu dle Charpyho, materiál m15, 10x10 mm	72
Tab. 18 Výsledky zkoušek rázem v ohybu dle Charpyho, materiál m15, 3x4 mm	72
Tab. 19 Shrnutí výsledků měření přechodové teploty $FATT_{50}$	75
Tab. 20 Shrnutí výsledků naměřených hodnot KCV s vyhodnocením křehkého lomu (BF)	76
Tab. 21 Výsledky normalizovaných hodnot KCV v %	79
Tab. 22 Teplotní posun pro materiály m08 a m15	80
Tab. 23 Výsledky měření $FATT_{50}$ v práci [11]	80
Tab. 24 Orientace odběru zkušebních těles pro měření LH vůči polotovaru	82
Tab. 25 Shrnutí měření lomové houževnatosti pro materiál m11, 20°C	88
Tab. 26 Shrnutí měření lomové houževnatosti pro materiál m12, 20°C	88
Tab. 27 Shrnutí měření lomové houževnatosti pro materiál m15, 20°C	88
Tab. 28 Shrnutí měření lomové houževnatosti pro materiál m14, 20°C	88
Tab. 29 Výsledky lomové houževnatosti, materiál m17, 20°C	93
Tab. 30 Výsledky lomové houževnatosti, materiál m18, 20°C	93
Tab. 31 Výsledky lomové houževnatosti, materiál m19, 20°C	93
Tab. 32 Výsledky lomové houževnatosti pro všechny měřené materiály	94
Tab. 33 Porovnání výsledků LH pro m19 při 20°C dle norem <i>ASTM E1820</i> [8] a <i>ISO 12135</i> [9]	95
Tab. 34 Výsledky SPT pro materiály m01 – m07 (bez měření h_f)	102
Tab. 35 Výsledky SPT pro materiály m08 – m13 (včetně měření h_f)	103
Tab. 36 Výsledky SPT pro materiál m14 (včetně měření h_f)	104
Tab. 37 Výsledky SPT pro materiál m15 (včetně měření h_f)	104
Tab. 38 Výsledky SPT pro materiál m16 (včetně měření h_f)	105
Tab. 39 Výsledky SPT pro materiál m17 (včetně měření h_f)	105
Tab. 40 Výsledky SPT pro materiál m18 (včetně měření h_f)	105
Tab. 41 Výsledky SPT pro materiál m19 (včetně měření h_f)	106
Tab. 42 Výsledky měření SPT přechodové teploty pro materiál m08	107
Tab. 43 Výsledky měření SPT přechodové teploty pro materiál m15	108
Tab. 44 Výsledky měření SPT přechodové teploty pro materiály m08 a 015	108
Tab. 45 Výsledky zkoušky tahem a SPT	110
Tab. 46 Hodnoty tahových vlastností vypočítaných dle vztahů (73) - (75)	112
Tab. 47 Hodnoty koeficientu a_{SPT}	113
Tab. 48 Vyhodnocení efektivní lomové deformace ε_f na základě:	115
Tab. 49 Hodnoty LH vypočítané dle vztahu (80)	116
Tab. 50 Výsledky měření M-TT	120
Tab. 51 Porovnání výsledků měření M-TT a standardní zkoušky tahem	120

Seznam publikací

1. **Konopík P., Duchek P.:** Příprava nanoaditiv pro anorganicko-organické nátěry a filmy nové generace, diplomová práce, ZČU v Plzni, květen 2007
2. **Džugan, J., Konopík, P., Motyčka, P., Nový, Z., Stejskal, O.:** Application of Physical Simulator to Forming Processes Simulation, Metal 2008, 13. - 15. 5. 2008, Červený zámek, Hradec nad Moravicí. Česká republika. ISBN 978 -80-254-1987-8.
3. **Konopík, P., Džugan, J., Nový, Z., Podaný, P.:** Verification of Physical Simulator Applicability For Hot Rolling Simulation, Junior-Euromat, 14.-18. 7. 2008, Lausanne, Switzerland.
4. **Džugan, J., Nový, Z., Konopík, P., Motyčka, P., Stejskal, O.:** Fatigue Life Optimization of 34CrNiMo6 Steel by Thermomechanical Treatment With The Use of Physical Simulator , AMPT 8, 2-5. 11.2008, Bahrain.
5. **Motyčka, P., Konopík, P.:** Fyzikální simulace tváření při jednoosém zatěžování a odporovém ohřevu zkušebních vzorků, 7.Kovárenská konference, 13-14.5.2009, Brno, Česká republika
6. **Džugan, J., Konopík, P., Zemko, M., Varga, R., Hosnedl, P.:** Tensile Properties Determination of Ni-Alloy With The Use of Small Punch Test Technique, 26th Danubia-Adria Symposium on Advances Experimental Mechanics, 23rd - 26th September 2009, Leoben, Austria.
7. **Konopík, P., Džugan, J.:** Stanovení křehkolomových charakteristik pomocí SPT, Žínkovy 2010, ISBN: 978-80-7043-885-5.
8. **Džugan J., Konopík P., Nový Z., Motyčka P.:** Improvement of Fatigue Properties of 34CrNiMo6 Steel by Controlled Thermomechanical Treatment, Metal 2010, 18.-20.5.2010, Rožnov pod Radhoštěm, Česká republika
9. **Konopík, P., Hauserová, D., Nový, Z., Podaný, P.:** Optimization of Elongation of Docol 1200 Steel, Junior-Euromat, 26.-30. 7. 2010, Lausanne, Switzerland.
10. **Džugan J., Konopík P.:** Evaluation Of Fracture Toughness Properties For Low Carbon Steel In The Brittle State By Small Punch Test Technique, The 1st International Conference SSTT, 31.8.-2.9.2010, Ostrava, Czech Republic
11. **Konopík, P., Džugan J.:** Small Punch Test Application To Fracture Toughness Determination In The Upper Shelf Region, The 1st International Conference SSTT, 31.8.-2.9.2010, Ostrava, Czech Republic
12. **Hosnedl, P., Nový, Z., Konopík, P., Džugan, J., Tikal, F.:** Structural Materials And Fluoride Salts For High Temperature Applications, COMAT 2010, 25 – 26 November 2010, ISBN: 978-80-254-8683-2
13. **Džugan J., Konopík P.:** Small Punch Tests For Tensile Properties And Fracture Toughness Determination, COMAT 2010, 25 – 26 November 2010, ISBN: 978-80-254-8683-2
14. **Džugan, J., Konopík, P.:** Small punch tester tensile properties and fracture toughness determination, COMAT 2010, 25-26.11, 2010, Pilsen Czech Republic.

15. **Džugan J., Konopík P.:** Vyhodnocení tahových vlastností a lomové houževnatosti pomocí Small Punch Testu, sborník semináře Křehký lom 2010, Brno 4.11.2010, ISBN 978-80-87434-01-7
16. **Džugan J., Donátová M., Konopík P., Dlouhý J.:** Fatigue life improvement of metal sheets made of 34CrNiMo6 steel, Metal 2011, 18. - 20. května 2011, Brno
17. **Džugan J., Konopík P.:** Small Punch Test Application To Material Properties Evolution Determination, International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2011, Semptember 19-21, 2011, Kobe (Japan)
18. **Konopík P., Džugan J.:** Mechanical properties evaluation using small punch test and micro-tensile test samples, Euromat 2011, Semptember 12-15, 2011, Montpellier, France
19. **Džugan J., Konopík P., Prochazka R.:** Mechanical properties determination for nanomaterials, 1.odborne diskuzni forum nanotechnologie, Ostravice, November 15.-16., 2011, Czech Republic
20. **Konopík P., Viehrig H.-W.:** Assessment of the J-R curve evaluation procedure according to ASTM E1820 and ISO12135, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, research report, 2012
21. **Konopík P., Viehrig H.-W.:** Characterization of Material P91, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, research report, 2012
22. **Konopík P., Džugan J.:** Assessment of Mechanical Properties of the Structural Steels by Small Punch Test and Micro –Tensile Test, Junior Euromat, Lausanne, July 23.-27.2012
23. **Konopík P., Džugan J.:** Determination of Tensile Properties of Low Carbon Steel and Alloyed Steel 34CrNiMo6 by Small Punch Test and Micro-Tensile Test, 2st International Conference SSTT, 2.10.-4.10.2012, Ostrava, Czech Republic, ISBN 978-80-260-0079-2
24. **Prantl, A., Džugan, J., Konopík, P.:** Identification of Ductile Damage Parameters - Experimental Part, COMAT 2012, Plzeň, 20-22.11.2012.
25. **Konopík P., Viehrig, H.-V.:** Fracture Toughness Characterization of The Martensitic Chromium Steel P91, COMAT 2012, Plzeň, 20-22.11.2012.
26. **Prantl, A., Růžička, J., Španiel, M., Moravec, M., Džugan, J., Konopík, P.:** Identification of Ductile Damage Parameters, Simulia Community Conference, May 22—24, 2013, VIENNA, AUSTRIA
27. **Marešová, M., Konopík, P.:** Tensile Testing at High Strain Rates using DIC Method, conference proceedings METAL 2013, 15-17. May, Brno, Czech Rep. ISBN 978-80-87294-39-0.
28. **Konopík P., Džugan J., Procházka R.:** Determination of Fracture Toughness and Tensile Properties of Structural Steels by Small Punch Test and Micro-Tensile Test, conference proceedings METAL 2013, 15-17. May, Brno, Czech Rep. ISBN 978-80-87294-39-0.
29. **Džugan J., Konopík P., Procházka R.:** Mechanical Characterization of Nanomaterials with the Use of Mini – samples, setkání řešitelů projektu Nanotým VŠB-TU Ostrava, 21.2. - 22.2.2013, Kopřivnice

30. **Džugan, J., Prantl, A., Konopík, P., Spaniel M.:** Identification Of Ductile Damage Parameters For Pressure Vessel Steel, SMiRT-22, San Francisco, California, USA - August 18-23, 2013
31. **Džugan, J., Prantl, A., Spaniel, M., Konopík, P., Ruzicka, J., i Kuzelka, J.:** Identification of Ductile Damage Parameters for Pressure Vessel Steel, SMiRT-22, 18-30 September 2013, San Francisco, USA
32. **Džugan, J., Novy, Z., Konopík, P., Podany, P., Folkova, E.:** Creep Properties of Heat Affected Zone In Heterogeneous Welded Rotor, EPRI 7th International Conference on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants, October 22–25, 2013, Waikoloa Village, Hawaii, USA
33. **Konopík, K., Džugan, J., Procházka R.:** Evaluation of Local Mechanical Properties of Steel Weld by Miniature Testing Techniques, Materials Science & Technology 2013, Montreal, Canada, October 27–31 2013, ISBN 978-0-87339-762-9
34. **Džugan, J., Konopík, P., Procházka, R.:** Determination of local mechanical properties for fem simulations, IMT 2013, Portorož, Slovenia, 13. - 15. 11. 2013 ISSN 1580-2949

Seznam výzkumných zpráv

1. Džugan, J., Konopík, P.: Metodiky měření vysokoteplotních závislostí skutečné napětí – skutečná deformace, měření vysokoteplotní instrumentované vrubové houževnatosti, měření Wöhlerových a Manson – Coffinových křivek a zkoušky lomové mechaniky, Report 2008-18.
2. Džugan, J., Konopík, P.: Determination of Correlation factor for longitudinal and tangential directions of Charpy impact toughness specimens, Report 2008-79
3. Džugan, J., Konopík, P.: Zkoušky nízkocyklové únavy materiálu 22CrMoNiWV88 při 400°C, Report 2008-80
4. Džugan, J., Konopík, P.: Zkoušky vysokocyklové únavy materiálu Bohler T505SC při 600°C, Report 2008-82
5. Džugan, J., Konopík, P.: Zkoušky vysokocyklové únavy materiálu 50CrMo4 metodou staircase, Report 2008-83
6. Džugan, J., Konopík, P.: Zkoušky vysokocyklové únavy materiálu Titan Gr.5 při 100°C, Report 2008-89
7. Džugan, J., Konopík, P.: Investigations of M81 and M82 steels, Report 2008-90
8. Džugan, J., Konopík, P.: Determination of Correlation factor for longitudinal and tangential directions of Charpy impact toughness specimens, Report 2008-90
9. Džugan, J., Konopík, P.: Determination of Correlation factor for longitudinal and tangential directions of Charpy impact toughness specimens , Report 2008-97
10. Džugan, J., Konopík, P.: Zkoušky vysokocyklové únavy materiálu Nimonic 80A při 650°C, Report 2008 -98
11. Džugan, J., Konopík, P.: Tensile and Charpy tests of materials after Q&P process, Report 2009 -07
12. Džugan, J., Konopík, P.: Vyhodnocení materiálových charakteristik materiálu typové řady MoNiCr metodou Small Punch Test, Report 2009 -17
13. Džugan, J., Konopík, P.: Měření deformace toroidní trubky, Report 2009-21

14. Džugan, J., Konopík, P.: SYSWELD input data determination for low alloyed manganese steel, Report 2009 -25
15. Džugan, J., Konopík, P.: Zkoušky tahem materiálů 1.4509 a 1.4521 , Report 2009 -31
16. Džugan, J., Konopík, P.: Mechanical properties of LG966mod, Report 2009-32
17. Džugan, J., Konopík, P.: Zkoušky tahem a creepem , Report 2009-33
18. Džugan, J., Konopík, P.: Měření deformace toroidní trubky, Report 2009-46
19. Džugan, J., Konopík, P.: Mechanical properties and microstructure of LG762 and LG534 "T95", Report 2009 -49
20. Džugan, J., Konopík, P.: Wahre Spannungs Dehnungs Kurve LG 327 / True Stress-True Strain Diagram-LG327, Report 2009-72
21. Džugan, J., Konopík, P.: Longitudinal to transverse notch-toughness ratio - heat treated LG 276 , Report 2009-90
22. Džugan, J., Konopík, P.: Correlation between notch and fracture toughness for samples of different geometries, Report 2009-91
23. Džugan, J., Konopík, P.: Longitudinal to transverse notch-toughness ratio - LG 276 , Report 2009-92
24. Džugan, J., Konopík, P.: High Temperature Tensile and Compression Tests, Report 2009 - 93
25. Džugan, J., Konopík, P.: Tensile tests of chains, Report 2009 -96
26. Džugan, J., Konopík, P.: High temperature tensile and compression tests of X10CrAl7, Report 2010-03
27. Džugan, J., Konopík, P.: Zkoušky tahem a rázem v ohybu materiálu 27NiCrMoV15-6, Report 2010-05
28. Džugan, J., Konopík, P.: Zkoušky rázem v ohybu lopatkových materiálů pro NT díly, Report 2010-07
29. Džugan, J., Konopík, P.: Dynamické zkoušky tahem materiálu DOCOL 1200M, Report 2010-10
30. Džugan, J., Konopík, P.: Experimental determination of True Stress-True Strain Diagram of 34CrNiMo6, Report 2010-15
31. Džugan, J., Konopík, P.: Tensile tests in longitudinal and transversal direction of LG 525 and 276, Report 2010-17
32. Džugan, J., Konopík, P.: Toughness determination with mild notched specimen, Report 2010-35
33. Džugan, J., Konopík, P.: Měření mechanických a termofyzikálních vlastností výkovku COST F a odlitku CB2, Report 2010-51
34. Džugan, J., Konopík, P.: High temperature compression tests accordign to Rategaev - A21, E355 and X20Cr13, Report 2010-55
35. Džugan, J., Konopík, P.: Měření tvrdosti a modulu pružnosti Inconelu 718, Report 2010-62
36. Džugan, J., Konopík, P.: SYSWELD input data determination for 300M, 35NCD16, Ti5553, Report 2010-68
37. Džugan, J., Konopík, P.: Měření vysokocyklové únavy na vzorcích s vrubem, Report 2010-89

38. Džugan, J., Konopík, P.: High temperature compression tests according to Rastegaev X10CrAl18 and X10CrAl13, Report 2010-93
39. Džugan, J., Konopík, P.: Zkoušky nízkocyklové a vysokocyklové únavy materiálu Titan Gr. 5 na vzorcích s návarem při 100°C, Report 2010-94
40. Džugan, J., Konopík, P.: Determination of Crack Arrest Toughness-100
41. Džugan, J., Konopík, P.: Tensile strength of notched specimens for toughness evaluation, Report 2010-104
42. Džugan, J., Konopík, P.: Měření sil, deformací a teploty Ni drátu na zkušební přípravku Ae226497, Report 2010-110
43. Džugan, J., Konopík, P.: Únavové zkoušky stromečkových závěsů, Report 2010-115
44. Džugan, J., Konopík, P.: Validation of fracture-mechanical specimens, Report 2010-119
45. Džugan, J., Konopík, P.: Nameření materiálových vstupních dat pro program SYSWELD, Report 2010-121
46. Džugan, J., Konopík, P.: Měření lomové houževnatosti na tělesech pro tříbodový ohyb, Report 2010-126
47. Džugan, J., Konopík, P.: Zkoušky vysokocyklové únavy na tahových vzorcích s návarem materiálu Titan Gr. 5 při 100°C, Report 2010-128
48. Džugan, J., Konopík, P.: Zkoušky pro identifikaci parametrů tvárného porušení, Report 2010-155
49. Džugan, J., Konopík, P.: Zkoušky vzorků s komplexní geometrií, Report 2010-156
50. Džugan, J., Konopík, P.: Determination of transition temperature diagram, Report 2011-21
51. Džugan, J., Konopík, P.: Characterization LG624 and LG276, Report 2011-23
52. Džugan, J., Konopík, P.: Tubes in NPP, Report 2011-24
53. Džugan, J., Konopík, P.: Axialrissprobe BNX205, Report 2011-25
54. Džugan, J., Konopík, P.: Měření materiálových dat, Report 2011-26
55. Džugan, J., Konopík, P.: Zkoušky nízkocyklové únavy na plochých vzorcích s vrubem při 20°C, Report 2011-29
56. Džugan, J., Konopík, P.: Zkoušky únavy na svařencích, Report 2011-33
57. Džugan, J., Konopík, P.: Zkoušky tahem za zvýšených teplot na oceli DHQ1, Report 2011-41
58. Džugan, J., Konopík, P.: Zkoušky VCÚ plochých vzorků s jedním zubem, Report 2011-42
59. Džugan, J., Konopík, P.: Zkoušky vysokocyklové únavy při 100°C, Report 2011-45
60. Džugan, J., Konopík, P.: Zkoušky pro identifikaci parametrů tvárného porušení za zvýšených teplot, Report 2011-50
61. Džugan, J., Konopík, P.: Zkoušky tahem při 20°C a 300°C a rázem v ohybu při 20°C, Report 2011-52
62. Džugan, J., Konopík, P.: Měření statického a dynamického modulu pružnosti na TiGr5, Report 2011-62
63. Džugan, J., Konopík, P.: Měření lomové houževnatosti materiálu O8Ch18N10T vnitřních částí reaktoru-, Report 2011-71
64. Džugan, J., Konopík, P.: Měření statického a dynamického modulu pružnosti v tahu litiny GGG SiMo 4.05, Report 2011-73

65. Džugan, J., Konopík, P.: Mechanical properties of airbag tubes in both longitudinal and tangential direction, Report 2011-136
66. Džugan, J., Konopík, P.: LG090 42SiCr Q&P Part II - Tensile test, Report 2011-140
67. Džugan, J., Konopík, P.: Zkoušky tahem Al slitin legovaných karbidem bóru, Report 2011-170
68. Džugan, J., Konopík, P.: Metodika měření vysokocyklové únavy závěsů lopatek parních turbín při vícesém zatěžování, Report 2011-178
69. Džugan, J., Konopík, P.: True stress true strain diagrams, Report 2011-165
70. Džugan, J., Konopík, P.: Zkoušky rázem v ohybu, vysokocyklové únavy, rychlosti šíření únavové trhliny a lomové houževnatosti materiálů svařovaného rotoru, Report 2011-156
71. Konopík, P., Marešová, M., Džugan, J.: True Stress - True Strain Diagrams of 26MnB5 and QStE400, Report ZP120107
72. Konopík, P., Marešová, M., Vokáč, J.: True Stress - True Strain Diagrams of TWIP steel, Report ZP120429
73. Potužník, L., Konopík, P.: Zkoušky vysokocyklové únavy a tahové zkoušky lopatkového materiálu Ti 6-4 Gr.5, ZP121219
74. Konopík, P., Marešová, M., Vokáč, J.: True Stress - True Strain Diagrams, Report ZP120325,
75. Džugan, J., Konopík, P.: Zkoušky NCÚ V-vrubovaných vzorků z výkovku Ti6/4 (Boehler), ZP120805
76. Džugan, J., Konopík, P., Podaný, P.: Krátkodobý creep svarových spojů COST F - COST FB2, Report 2011-184
77. Potužník, L., Konopík, P., Džugan, J.: Experimental Charpy Test for Ring Tube Samples, Report ZP 120802
78. Konopík, P., Marešová, M., Džugan, J.: Characterization of materials after QT treatment, ZP 120813
79. Konopík, P., Džugan, J., Vokáč, J.: Zkoušky nízkocyklové únavy jednoho hladkého vzorku z výkovku Gr.5 lopatky M4, ZP 120821
80. Potužník, L., Konopík, P., Džugan, J.: Zkoušky vysokocyklové únavy vzorků z Ti-lopatky za pokojové teploty, Report ZP 121012
81. Džugan, J., Konopík, P.: Transversal tensile test Tube 30x2 - Micro-tensile test, Report ZP 120902
82. Konopík, P., Marešová, M., Džugan, J.: True Stress - True Strain Diagrams of 26MnB5 and QStE400, Report ZP120107
83. Konopík, P., Džugan, J.: Zkoušky tahem pájených měděných spojů při pokojové teplotě, Report ZP 120913
84. Potužník, L., Konopík, P.: Zkoušky vysokocyklové únavy vzorků z lopatkového materiálu T671, navařených protierozním povlakem, Report ZP 121221
85. Potužník, L., Konopík, P., Džugan, J.: Zkoušky vysokocyklové únavy svařence rotoru, Report ZP 130202
86. Konopík, P., Podaný, P., Marešová, M.: Zkoušky nízkocyklové únavy svarového spoje materiálů P92 a CB2, ZP 121225

87. Potužník, L., Konopík, P.: Zkoušky vysokocyklové únavy kuličkových vzorků z výkovku titanové lopatky M4, Report ZP 121222
88. Potužník, L., Konopík, P.: Zkoušky nízkocyklové únavy kuličkových vzorků z výkovku titanové lopatky M4, Report ZP 121223
89. Džugan, J. Růžička, M., Jurenka, J., Konopík, P.: Zpráva o řešení projektu TA01020985 „Vývoj a modernizace závěsů lopatek parních turbín z pohledu zvýšení jejich spolehlivosti a životnosti“ za rok 2011
90. Džugan, J., Španiel, M., Konopík, P.: Závěrečná zpráva o řešení projektu FR-TI2/279, Report ZP 130211
91. Konopík, P., Procházka, R.: Měření dynamického modulu pružnosti ocelí 1.4006 (X12Cr13, AK1) a 1.4923 (X22CrMoV121, AK2MV), Report ZP 130206
92. Konopík, P., Džugan, J.: Vývoj přípravku pro SPT zkoušky do 400°C, Report ZP 120514
93. Konopík, P., Procházka, R.: Měření dynamického modulu pružnosti ocelí 1.4938 (T552), 1.4906 (T505SC) a 2.4952 (Nimonic 80A), Report ZP 130611
94. Konopík, P., Procházka, R.: Strain Controlled Wöhler Curves - Steel 22MnB5, Report ZP 130705
95. Konopík, P., Džugan, J.: Zkoušky pro identifikaci parametrů tvárného porušení smykových vzorků v tahu a tlaku, ZP 120514
96. Konopík, P., Džugan, J.: Zkoušky pro identifikaci parametrů tvárného porušení vzorků typu motýlek v přípravku, Report ZP 120444
97. Konopík, P., Džugan, J.: Zkoušky pro identifikaci parametrů tvárného porušení vzorků typu motýlek bez přípravku za dynamických podmínek, Report ZP 120613
98. Konopík, P., Džugan, J.: Měření materiálových charakteristik pro identifikaci parametrů tvárného porušení na miniaturních vzorcích, Report ZP 120916
99. Konopík, P., Džugan, J.: Měření materiálových charakteristik pro identifikaci parametrů tvárného porušení na vzorcích typu Nakazima a NT vzorcích, Report ZP121119
100. Konopík, P., Džugan, J.: Přehled použitých geometrií vzorků pro identifikaci parametrů tvárného porušení, Report ZP 121235
101. Konopík, P., Džugan, J.: Souhrnná zpráva o provedených měřeních pro identifikaci parametrů tvárného porušení, Report ZP 121236
102. Konopík, P., Potužník, L., Procházka, R.: Investigation of material properties of pipes, Report ZP130804
103. Vokáč, J., Konopík, P., Džugan, J., Šuchmann, P.: Compression Tests According to Rastegaev of Steel 41CrAlMo7-10 and hot tensile test of Steel 41CrAlMo7-10 and LG 500, Report ZP 130902
104. Konopík, P., Vokáč, J., Rund, M.: Zkoušky nízkocyklové únavy materiálu 1.6957, Report ZP 130913
105. Konopík, P., Vokáč, J., Rund, M.: Zkouška nízkocyklové únavy materiálu C465, Report ZP 130914
106. Konopík, P., Procházka, R.: Měření deformace při čtyřbodovém ohybu oceli 16263, Report ZP130908
107. Konopík, P., Vokáč, J.: Měření charakteristiky rotačního tlumiče, Report ZP 131012

108. Konopík, P., Procházka, R.: Měření mechanických vlastností těsnících Ni kroužků, Report ZP 131015
109. Konopík, P., Rund, M.: Kvazistatické a dynamické zkoušky tahem, Report ZP131008
110. Konopík, P., Vokáč, J.: Měření charakteristiky rotačního tlumiče, Report ZP 131014
111. Konopík, P., Procházka, R.: Měření charakteristik pružin z trakčního a běžného podvozku, Report ZP 130915
112. Konopík, P.: Zkoušky rychlosti šíření únavové trhliny materiálu O8Ch18N10T, Report ZP 131011
113. Konopík, P., Vokáč, J., Rund, M.: Zkoušky nízkocyklové únavy materiálu Custom 465 při 100°C, Report ZP131108
114. Konopík, P., Vokáč, J., Rund, M.: Zkouška nízkocyklové únavy materiálu 422742 při 525 °C, Report ZP 131206
115. Konopík, P., Procházka, R.: Měření dynamického modulu pružnosti materiálů Custom 456 a MLX 17, Report ZP131218
116. Konopík, P., Vokáč, J., Rund, M.: Zkouška nízkocyklové únavy austenitické oceli při 20 °C, Report ZP 131201
117. Konopík, P., Procházka, R., Motyčka, P.: Měření deformačních charakteristik Ni slitin, Report ZP130619
118. Konopík, P., Vokáč, J., Rund, M.: Researching of rheological properties of steels 316L and XM – 19, Report ZP 14108
119. Konopík, P., Procházka, R.: Strain Controlled Wöhler Curves - Two materials HC500LA TRB, Report ZP 140210
120. Potužník, L., Konopík, P.: Mechanical Properties 42SiCr - Tensile tests and Charpy impact tests, Report ZP140213