



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

MECHANICKÉ VLASTNOSTI NÍZKOUHLÍKOVÝCH A NÍZKOLEGOVANÝCH OCELÍ, STANOVENÉ POMOCÍ PROTLAČOVACÍCH ZKOUŠEK NA MINIATURNÍCH DISCÍCH PŘI POKOJOVÉ A SNÍŽENÝCH TEPLOTÁCH

DETERMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF LOW CARBON AND LOW
ALLOY STEELS VIA SMALL PUNCH TESTS AT ROOM AND LOW TEMPERATURES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Peter Závodský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Libor Válka, CSc.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav materiálových věd a inženýrství
Student:	Bc. Peter Závodský
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Materiálové inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Libor Válka, CSc.
Akademický rok:	2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Mechanické vlastnosti nízkouhlíkových a nízkolegovaných ocelí, stanovené pomocí protlačovacích zkoušek na miniaturních discích při pokojové a snížených teplotách

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Stanovování základních mechanických charakteristik pomocí protlačovacích zkoušek na miniaturních discích (small punch test, SPT) je odůvodněné zejména v případech, kdy použití klasických metod zkoušení mechanických vlastností není možné, typicky z důvodu nedostatku experimentálního materiálu. Často diskutovanou je problematika korelace výsledků SPT s výsledky standardních zkoušek za podmínek statického a dynamického zatěžování (zkoušek tahem a zkoušek rázem v ohybu) ve stejném intervalu teplot.

Cíle diplomové práce:

Práce by měla obsahovat:

- shrnutí současného stavu využití SPT pro studium lomově-mechanické odezvy materiálů a určování materiálových charakteristik
- měření mechanických charakteristik nízkouhlíkové a nízkolegované oceli pomocí SPT při pokojové a snížených teplotách, zahrnující:
 - a) návrh zkušebního zařízení (přípravku) vhodného pro realizaci penetračních testů za pokojové a snížených teplot
 - b) přípravu zkušebních těles pro měření metodou SPT
 - c) provedení zkoušek SPT při pokojové a snížených teplotách
- vyhodnocení teplotních závislostí základních mechanických charakteristik, získaných ze zkoušek SPT
- fraktografickou analýzu porušených zkušebních těles
- srovnání získaných výsledků s dostupnými výsledky standardních mechanických zkoušek

- formulaci závěrů

Seznam literatury:

CWA 15627 (2007): Small Punch Test Method for Metallic Materials. Part A: A Code of Practice for Small Punch Creep Testing and Part B: A Code of Practice for Small Punch Testing for Tensile and Fracture Behaviour, Documents of CEN WS21, Bruxelles.

Matocha, K. (2010): Hodnocení mechanických vlastností konstrukčních ocelí pomocí penetračních testů. 1. vyd. Ostrava, VŠB-TU, 73 s., ISBN 978-80-248-2223-5.

Lucas, G. E. (1983): The development of small specimen mechanical test techniques. Journal of Nuclear Materials, Vol. 117, July 1983, pp. 327-339, DOI: 10.1016/0022-3115(83)90041-7.

Mao, X., Saito, M., Takahashi, H. (1991): Small punch test to predict ductile fracture toughness J_{Ic} and brittle fracture toughness K_{Ic} . Scripta Metallurgica et Materialia, Vol. 25, No. 11, pp. 2481-2485, DOI:10.1016/0956-716X(91)90053-4.

García, T. E., Rodríguez, C., Belzunce, F. J., Suárez, C.: Estimation of the mechanical properties of metallic materials by means of the small punch test. Journal of Alloys and Compounds, Vol. 582 (2014), pp. 708-717, ISSN 0925-8388.

Contreras, M. A., Rodríguez, C., Belzunce, F. J., Betegón, C. (2008): Use of the small punch test to determine ductile-to-brittle transition temperature of structural steels. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 31, No. 9, pp. 727-737, ISSN 8756758X.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 28. 11. 2015



prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Predkladaná diplomová práca sa zaoberá inovatívnou metódou skúšania materiálov, tzv. penetračnou skúškou (*Small Punch Test*). Je naznačený základný princíp metódy s uvedením hlavných predností a obmedzení, s ktorými sa potýkame pri skúškach na malých vzorkách. Uvedené sú postupy využívané za účelom korelácie výsledkov penetračných skúšok na hodnoty štandardne používaných materiálových parametrov. Práca obsahuje konštrukčný návrh skúšobného prípravku a výsledky meraní na 12 vzorkách v teplotnom intervale (-80 až $+25$) °C. Bola preukázaná rôzna miera zhody teplotných závislostí mechanických parametrov stanovených z výsledkov penetračných skúšok s výsledkami štandardných skúšok, ktorá závisí najmä na voľbe vhodných prepočtových rovníc.

Kľúčové slová

Small Punch Test, SPT, ťahová skúška, skúšanie materiálov, korelácia, mechanické vlastnosti, teplotná závislosť, tranzitná teplota, oceľ, MKP, skúšobný prípravok

ABSTRACT

The presented diploma thesis deals with an innovative material test, so called *Small Punch Test*. There are main principles, advantages and limitations of the test stated in the thesis. There are stated also correlation procedures in order to obtain standard mechanical properties. A test fixture design has been done in order to perform test procedures at temperature range from -80 to 25 °C. Twelve experimental curves have been obtained from the test and typical quantities have been evaluated. The different accuracy of correlations with standard mechanical properties has been obtained using different correlation equations.

Key words

Small Punch Test, SPT, tensile test, materials testing, correlation, mechanical properties, temperature dependence, transition temperature, steel, FEM, test fixture, fixture design

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

ZÁVODSKÝ, P. *Mechanické vlastnosti nízkouhlíkových a nízkolegovaných ocelí, stanovené pomocí protlačovacích zkoušek na miniaturních discích při pokojové a snížených teplotách*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 70 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Libor Válka, CSc..

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som diplomovú prácu na tému **Mechanické vlastnosti nízkouhlíkových a nízkolegovaných ocelí, stanovené pomocí protlačovacích zkoušek na miniaturních discích při pokojové a snížených teplotách** vypracoval samostatne podľa pokynov vedúceho diplomovej práce s použitím odbornej literatúry a prameňov uvedených v zozname literatúry.

27. 5. 2016

Dátum

Bc. Peter Závodský

POĎAKOVANIE

Touto cestou by som sa chcel poďakovať vedúcemu diplomovej práce Ing. Liborovi Válkovi, CSc. za ochotu, cenné pripomienky a rady, ktoré mi počas práce poskytoval. Podobne by som sa chcel poďakovať Ing. Jane Petzovej, PhD. a Ing. Milošovi Baľákovi z Výskumného ústavu jadrových elektrární VUJE, a.s., Trnava za poskytnutie zaujímavých materiálov a skúseností z praxe z danej problematiky a taktiež Ing. Josefovi Zapletalovi, Ph.D. za konzultácie v priebehu procesu konštrukčného návrhu prípravku pre penetračné skúšky.

OBSAH

ÚVOD	1
I. TEORETICKÁ ČASŤ	2
1 NEDEŠTRUKTÍVNY ODBER, PRÍPRAVA A TYPY VZORIEK	2
1.1 Princíp mechanického odbrusovania [1, 3, 6, 7].....	2
1.2 Princíp elektroiskrového rezania [1, 8].....	3
1.3 Príprava a typy vzoriek.....	3
2 PENETRAČNÁ SKÚŠKA – ZÁKLADNÝ PRINCÍP, ROZDELENIE	5
2.1 Princíp a rozdelenie penetračných skúšok.....	5
2.2 Vyhodnotenie záznamu a popis veličín stanoviteľných z penetračnej skúšky.....	9
2.3 Technická dohoda CWA 15267, stav normalizácie skúšok SPT.....	13
2.3.1 Prednosti a vhodné oblasti aplikácie penetračných skúšok.....	14
2.3.2 Obmedzenia penetračných skúšok.....	15
2.4 Vplyv externých faktorov na výsledky penetračných skúšok.....	17
2.5 Porovnanie penetračnej a ťahovej skúšky.....	22
3 STANOVENIE ŠTANDARDNÝCH MATERIÁLOVÝCH PARAMETROV Z ČASOVO NEZÁVISLÝCH PENETRAČNÝCH SKÚŠOK	24
3.1 Prepočet parametrov získaných zo skúšky SPT na hodnotu medze klzu R_e	24
3.2 Prepočet parametrov získaných zo skúšky SPT na hodnotu medze pevnosti R_m	26
3.3 Inovovaný prístup prepočtu parametrov z penetračnej skúšky na medzu klzu R_e a medzu pevnosti R_m pre ocele podľa [22].....	28
3.4 Prepočet parametrov získaných zo skúšky SPT na hodnotu ťažnosti A	32
3.5 Prepočet hodnoty tranzitnej teploty T_{SP} na hodnotu tranzitnej teploty $FATT$	33
II. EXPERIMENTÁLNA ČASŤ	37
4 NÁVRH SKÚŠOBNÉHO PRÍPRAVKU A PRÍPRAVA VZORIEK	38
4.1 Popis častí prípravku, usporiadania skúšky a použitých snímačov.....	39
4.2 Popis experimentálneho materiálu.....	41
4.3 Príprava vzoriek pre penetračné skúšky.....	43
5 VÝSLEDKY A DISKUSIA	45
5.1 Stanovenie teplotných závislostí štandardných mechanických charakteristík z klasických skúšok.....	45
5.2 Stanovenie teplotných závislostí štandardných mechanických charakteristík z penetračných skúšok.....	49
5.2.1 Stanovenie teplotnej závislosti medze klzu R_{eL}	49
5.2.2 Stanovenie teplotnej závislosti medze pevnosti R_m	53
5.2.3 Stanovenie teplotnej závislosti ťažnosti A	55
5.2.4 Stanovenie tranzitnej teploty $FATT$ z výsledkov penetračných skúšok.....	56
5.3 Fraktografická analýza porušených vzoriek pre penetračné skúšky.....	57
6 ZÁVER	58
ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	60
ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK	63
ZOZNAM OBRÁZKOV	66
ZOZNAM TABULIEK	69
ZOZNAM PRÍLOH	70

ÚVOD

S cieľom zjednodušiť, zlacniť, ale najmä umožniť vykonanie materiálových skúšok v aplikáciách, kde to pre nedostatok experimentálneho materiálu predtým nebolo možné, alebo bolo príliš nákladné, bola počiatkom 80. rokov minulého storočia v USA a Japonsku vedená iniciatíva k nájdeniu takej metódy skúšania, ktorá by tieto problémy eliminovala. Snahou bolo nájsť metódu skúšania k posúdeniu aktuálneho stavu mechanických, krehkolomových, či ďalších charakteristík s možnosťou stanoviť zostatkovú životnosť prevádzkovaného zariadenia. Výsledkom tejto snahy je skúška *Small Punch Test (SPT)*, slovenským prekladom *penetračná skúška*. Vyvíjaná bola najmä pre potreby jadrovej energetiky na hodnotenie radiačného krehnutia materiálov dôležitých komponentov primárneho okruhu jadrových elektrární ako chladiace potrubia, plášť parogenerátora, či tlaková nádoba reaktora. Okrem vyššie spomínaných predností treba spomenúť, že kvôli veľmi malému objemu materiálu potrebnému k príprave vzoriek je penetračná skúška považovaná za skúšku nedeštruktívnu a následná oprava zariadení, najčastejšie navarovaním materiálu, nie je potrebná. Odber materiálu zo zariadení tak môže byť vykonaný aj za prevádzky bez potreby odstávok [1, 2, 3, 4].

V súčasnosti je trendom zvyšovať životnosť zariadení a konštrukcií, čo je motivované najmä ekonomickým hľadiskom. V tomto smere je kľúčový spoľahlivý a pravidelný prehľad o zmenách materiálových parametrov počas životnosti zariadenia. V prípade, že poznáme počiatkové hodnoty týchto parametrov, predstavuje penetračná skúška jednu z vhodných skúšok za účelom stanovenia ich zmeny v priebehu dlhodobej prevádzky zariadenia s možnosťou predĺženia jeho plánovanej životnosti [3, 4, 5].

S využitím neustále sa vyvíjajúcich technológií trhacích strojov, snímačov a s využitím počítačom riadených procesov skúšania, je možné dosiahnuť prostredníctvom penetračných skúšok vysokú presnosť porovnateľnú s klasickými metódami skúšania, hoci vplyvom zmenšenia rozmerov skúšobných telies vnášame okrem ďalších aspektov isté riziko zníženia presnosti a reprodukovateľnosti merania. Počítať však treba s faktom, že získané výsledky úzko súvisia s kvalitou a reprodukovateľnosťou prípravy vzoriek, kde je požadovaná veľmi malá tolerancia hrúbky, vysoká kvalita povrchu, či vysoká presnosť rovnobežnosti skúšaných povrchov [1, 6, 7].

Penetračná skúška nie je do dnešného dňa normalizovaná. V súčasnosti jediným oficiálnym dokumentom, ktorý zjednocuje skúšobné postupy a podmienky priebehu skúšok tohto typu je technická dohoda CWA 15267 – Metodika skúšania kovových materiálov pomocou penetračných skúšok na miniatúrnych diskoch (*Small Punch Test Method for Metallic Materials*) [8], publikovaná v decembri roku 2007 v Bruseli.

I. TEORETICKÁ ČASŤ

1 NEDEŠTRUKTÍVNY ODBER, PRÍPRAVA A TYPY VZORIEK

Hoci je penetračná skúška považovaná za skúšku nedeštruktívnu, za účelom odobratia skúšobného materiálu je potrebný súhlas prevádzkovateľa zariadenia. Miesto odberu býva často stanovené z pevnostných výpočtov [1, 5, 6, 8].

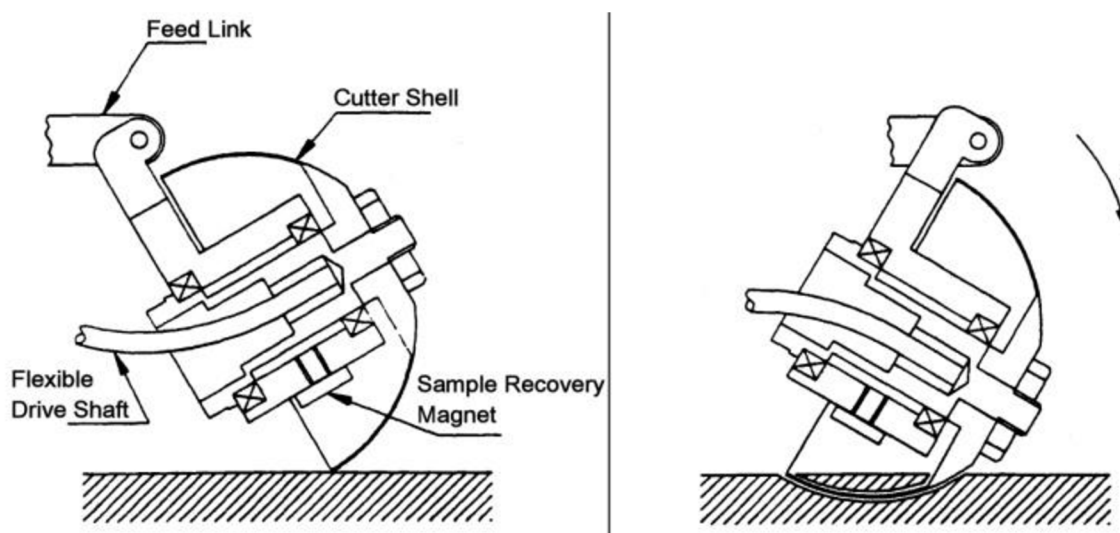
Na odber materiálu existujú v súčasnosti 2 typy zariadení

- zariadenie na princípe mechanického odbrusovania
- zariadenie na princípe elektroiskrového rezania

1.1 Princíp mechanického odbrusovania [1, 3, 6, 7]

Odberové zariadenie na tomto princípe bolo patentované spoločnosťou *Failure Analysis Associates* v roku 1989 v USA – odberové zariadenie *SSamTM-2*, vid' obr. 1. V súčasnosti je uvedené zariadenie vyrábané firmou *Rolls-Royce*.

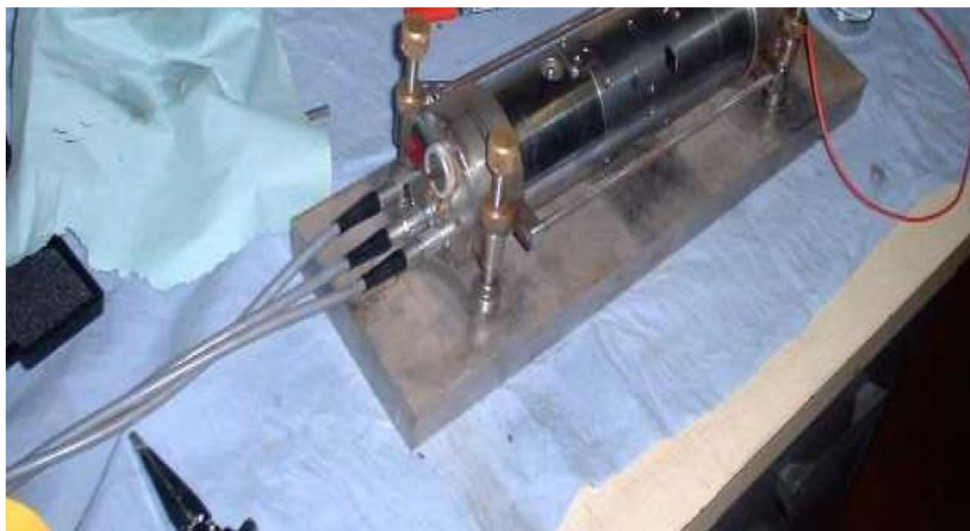
V priebehu odberu je brúsny klobúčik z nitridu bóru s priemerom 50 mm a hrúbkou asi 0,7 mm pomaly posúvaný do záberu. Zariadenie pracuje na princípe pákového mechanizmu. Vysoká obvodová rýchlosť až 10 000 ot./min a možnosť chladenia vodou v priebehu odberu zamedzuje tepelnému ovplyvneniu odoberaného materiálu. Po odbrúsení je materiál prichytený na magnet. Výsledkom odberu je guľový vrchlík s priemerom 25 mm a hĺbkou 3-4 mm.



Obr. 1 Schéma zariadenia *SSamTM-2* spoločnosti *Rolls-Royce* [3]

1.2 Princíp elektroiskrového rezania [1, 8]

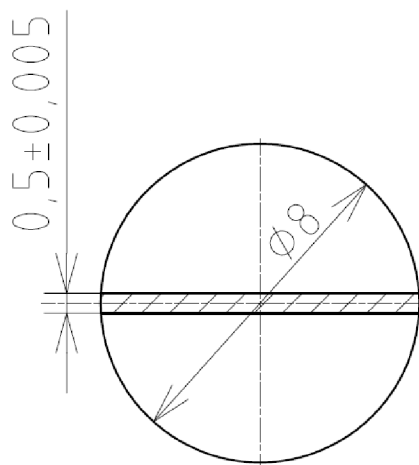
V priebehu odberu dochádza k selektívnemu odtaveniu malých častíc materiálu. Príklad odberového zariadenia na princípe elektroiskrového rezania je uvedený na obr. 2. Odobraný je materiál s dĺžkou 30 mm a hrúbkou 6 mm. V porovnaní s predchádzajúcou metódou by do odobraného materiálu mala byť vnesená menšia napätosť. Napriek tomu však najčastejšie býva používané zariadenie na princípe mechanického odbrusovania.



Obr. 2 Zariadenie na princípe elektroiskrového rezania [8]

1.3 Príprava a typy vzoriek

Z materiálu získaného napríklad odberovým zariadením *SSamTM-2* je možné pripraviť 3-4 skúšobné vzorky odporúčaných rozmerov podľa technickej dohody CWA 15267 s priemerom 8 mm a hrúbkou 0,5 mm pre samotnú penetračnú skúšku, viď obr. 3. Nakoľko skúška nie je dodnes normalizovaná, existujú ďalšie možné varianty rozmerov vzoriek. Napríklad $\varnothing 3$ mm a hrúbka 0,25 mm (vzorka rozmeru pre TEM – transmisnú elektrónovú mikroskopiu), skúšobné vzorky v tvare štvorca (10×10) mm s hrúbkou 0,5 mm alebo 0,25 mm [1, 3].



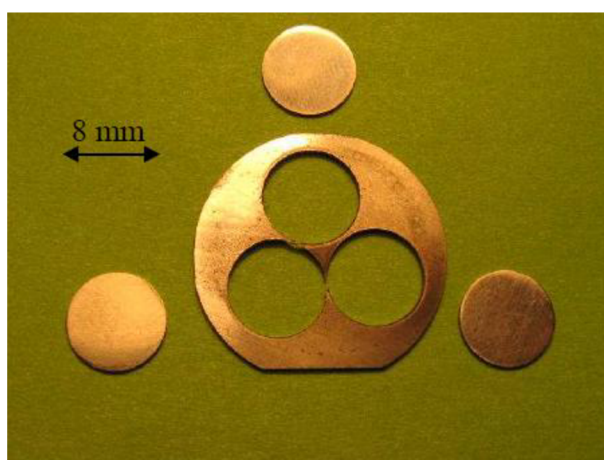
Obr. 3 Najčastejšie používaný rozmer vzoriek pre penetračné skúšky

Ako vyplýva z obr. 3, požaduje sa dosiahnutie veľmi úzkeho intervalu hrúbky vzoriek. To kladie zvýšené požiadavky na kvalitu a reprodukovateľnosť prípravy vzoriek. Požadované sú tolerancie v ráde tisícín mm.

Na pracoviskách, kde sa metóda skúšania SPT využíva pravidelne s veľkými sériami vzoriek, je snaha prípravu vzoriek v čo najväčšej miere automatizovať. Výsledkom je zníženie nákladov a času potrebného na prípravu vzoriek a zvýšenie reprodukovateľnosti kvality vzoriek. Jedno z takýchto zariadení bolo vyvinuté v laboratóriách spoločnosti VUJE, a.s., Trnava. Samotné zariadenie je založené na princípe programovateľného elektroiskrového rezania (*electrical discharge machine* - EDM), vid' obr. 4. Zariadenie umožňuje pripraviť až 120 vzoriek za pracovný deň bez potreby operátora [9].



Obr. 4 Programovateľné zariadenie na princípe elektroiskrového rezania [9]



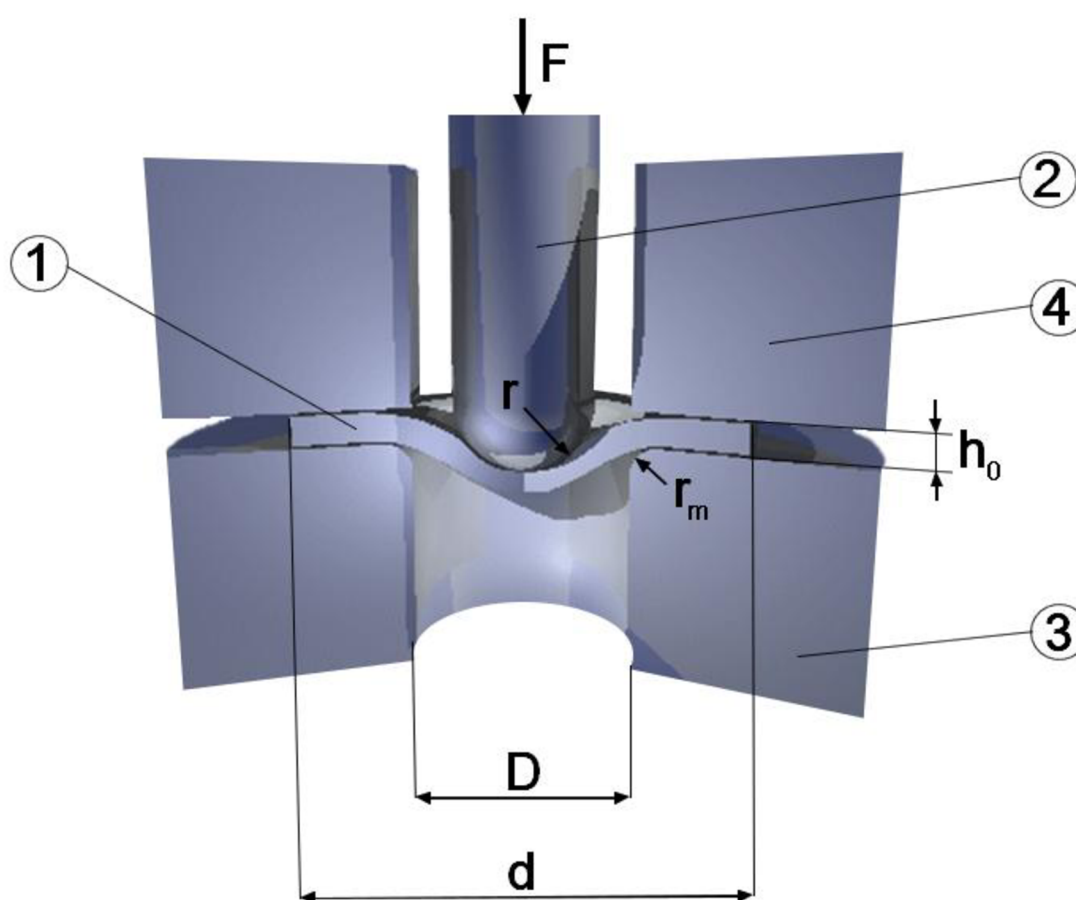
Obr. 5 Vzorky oddelené programovateľným zariadením EDM [2]

Po oddelení jednotlivých vzoriek (obr. 5) je potrebné vykonať brúsenie a leštenie. Za týmto účelom býva najčastejšie použitá metalografická brúska, pričom brúsenie s leštením musí byť vykonané z oboch strán vzorky. Hrúbka vzoriek musí byť v priebehu procesu brúsenia a leštenia neustále kontrolovaná, pričom je potrebné dosiahnuť výslednú hrúbku najčastejšie $h_0 = 0,500 \pm 0,005$ mm [9].

2 PENETRAČNÁ SKÚŠKA – ZÁKLADNÝ PRINCÍP, ROZDELENIE

2.1 Princíp a rozdelenie penetračných skúšok

Základom penetračnej skúšky je prienik razníku cez skúšobnú vzorku až do porušenia a získanie závislosti *zaťaženie – posunutie* razníka. Bolo overené (napr. [3, 4]), že závislosť zaznamenaná pri penetračnej skúške obsahuje informáciu o pevnostných charakteristikách materiálu a informáciu o jeho elasto-plastickej odozve na zaťažovanie. Z tejto závislosti sú stanovované charakteristické veličiny penetračných skúšok, ktoré sú následne korelované rôznymi postupmi so štandardnými pevnostnými charakteristikami stanoviteľnými konvenčnými mechanickými skúškami [1, 8].



Obr. 6 Schematické usporiadanie penetračnej skúšky

1 – skúšobná vzorka, 2 – razník, 3 – spodná operná matrica, 4 – horná operná matrica

Veličina F v obr. 6 predstavuje záťaž aplikovanú na skúšobnú vzorku pôsobením razníka, h_0 je počiatková hrúbka skúšobnej vzorky, r značí polomer razníka, r_m je polomer zaoblenia spodnej opernej matrice, D je priemer pretláčacieho otvoru spodnej matrice, d je priemer kontaktnej časti, resp. priemer skúšobnej vzorky.

Penetračné skúšky môžeme podľa viacerých kritérií rozdeliť do niekoľkých skupín.

Podľa spôsobu (rýchlosti) zaťaženia

- a) **konštantná rýchlosť posuvu – časovo nezávislé skúšky** (CDR - *constant deflection rate*) – jedná sa o analógiu ťahovej skúšky, nakoľko v priebehu skúšky je rýchlosť posuvu razníka konštantná. Uvažovaná skúška môže prebiehať za izbových, znížených ale taktiež aj zvýšených teplôt bez prítomného creepového mechanizmu porušovania. Získavame závislosť *zaťaženie - posunutie razníka*, prípadne závislosť *zaťaženie – priehyb vzorky* [1, 8].
- b) **konštantné zaťaženie - časovo závislé skúšky** (CF - *constant force*) – v priebehu skúšky sa uplatňuje creepový mechanizmus porušovania, nakoľko sa skúška vykonáva za zvýšených teplôt. K zamedzeniu oxidácie skúšobnej vzorky sa často využíva inertná atmosféra. Za účelom možnosti porovnania so štandardnou creepovou skúškou býva veľkosť zaťaženia (veľkosť sily) volená tak, aby bol dosiahnutý rovnaký čas do porušenia ako pri štandardnej creepovej skúške. Získavame závislosť *priehyb vzorky – čas do porušenia* [1, 8].

Podľa teploty v priebehu skúšania

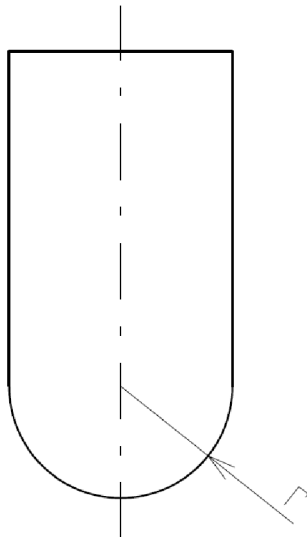
- a) **penetračné skúšky za izbových teplôt**
- b) **penetračné skúšky za znížených teplôt** – za znížené teploty považujeme také, pre ktorých dosiahnutie je potrebné využiť chladenie, jedná sa o teploty nižšie ako izbové. Využíva sa tepelne izolovaná komora s chladením parami dusíka [4, 8].
- c) **penetračné skúšky za zvýšených teplôt** – za zvýšené teploty považujeme také, na ktorých dosiahnutie je potrebné využiť ohrev, jedná sa o teploty vyššie ako izbové. Rozlišovať treba, či vplyvom zvýšenej teploty dochádza alebo nedochádza ku creepovému mechanizmu porušovania. Táto skutočnosť je závislá od typu skúšaného materiálu [1, 8].

Podľa spôsobu upnutia vzoriek [1, 8]

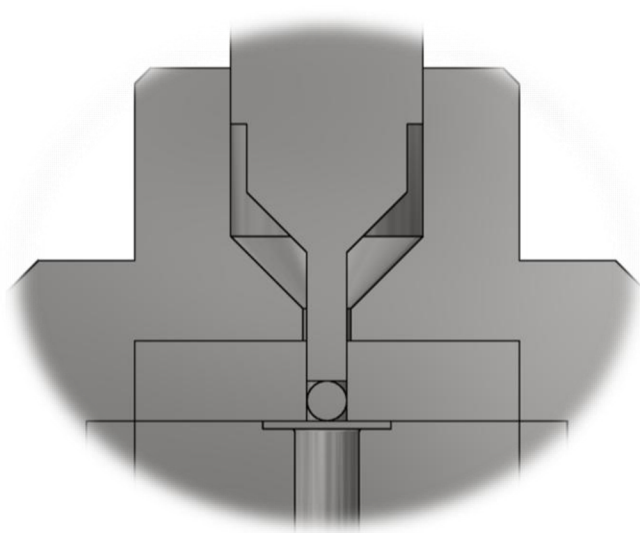
- a) **Bulge Punch Test** – skúšobná vzorka je v priebehu skúšky upnutá medzi matricami.
- b) **Punch Drawing Test** – skúšobná vzorka je v priebehu skúšky voľne položená na spodnej matrici.

Podľa tvaru razníka

- a) **gulôčkové penetračné skúšky** - v priebehu skúšky je skúšobná vzorka pevne zovretá medzi matricami. Penetrátorom je hemisférický razník (viď obr. 7), alebo razník v tvare gulôčky (konfigurácia podľa obr. 8). Gulôčka môže byť ocelová (tvrdená), prípadne keramická. Podľa [8] býva konštantná rýchlosť posuvu volená v rozsahu (0,2 – 2) mm/min. a polomer razníka r býva $r = 1$ mm alebo $r = 1,25$ mm.

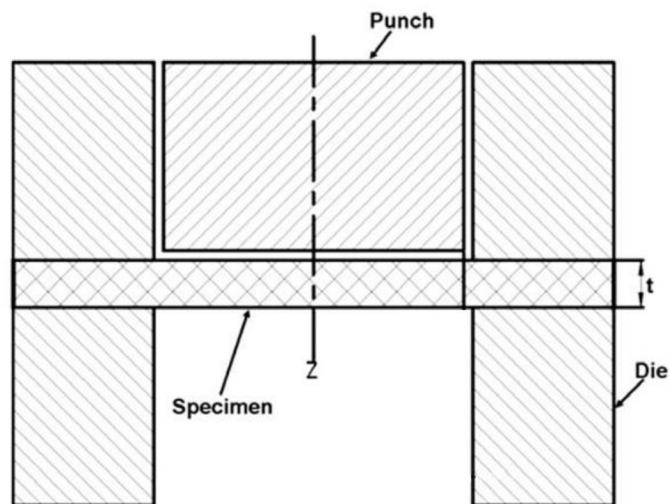


Obr. 7 Geometria razníka pre guľôčkovú penetračnú skúšku



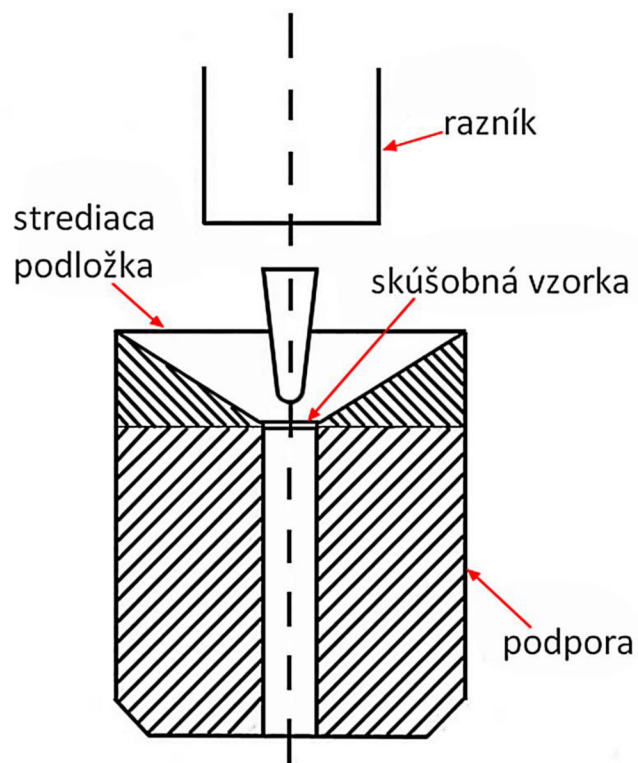
Obr. 8 Geometria razníka pre guľôčkovú penetračnú skúšku, konfigurácia použitá v rámci predkladanej diplomovej práce

- b) **strihové penetračné skúšky** – v priebehu skúšky je skúšobná vzorka pevne zovretá medzi matricami, ostrohranný kruhový razník je pretláčaný vzorkou až do porušenia, viď obr. 9 [1, 8, 10].



Obr. 9 Schéma strihovej penetračnej skúšky [14]

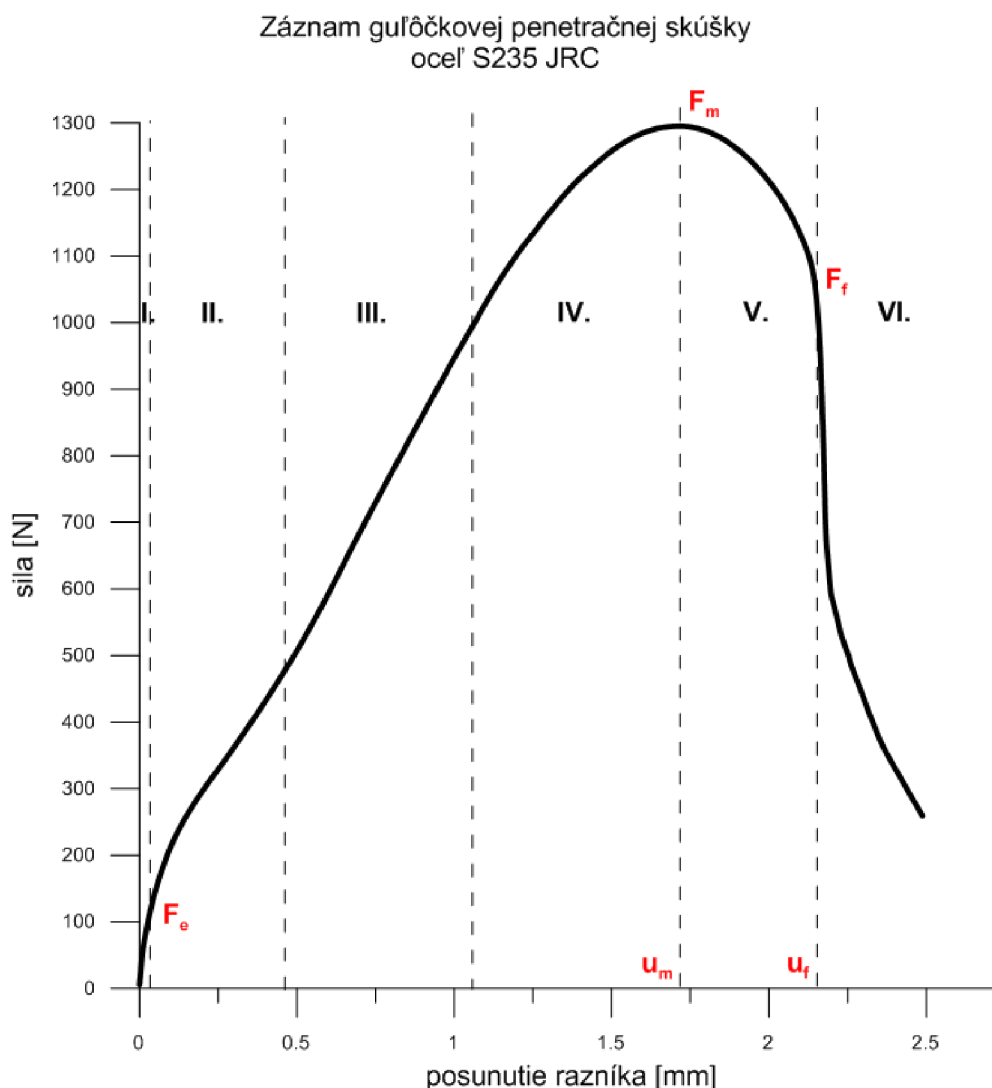
- c) **ohybové penetračné skúšky** – skúšobná vzorka je v priebehu skúšky voľne položená na spodnej matrici, razník v tvare kužela je pretláčaný vzorkou až do porušenia, viď obr. 10 [1, 8].



Obr. 10 Schéma ohybovej penetračnej skúšky, upravené podľa [1]

V predkladanej diplomovej práci budeme pracovať len s guľôčkovým penetračným testom v konfigurácii podľa obr. 8. Navrhnuté usporiadanie skúšobného prípravku a detailnejší popis jeho geometrie je uvedený v experimentálnej časti diplomovej práce.

2.2 Vyhodnotenie záznamu a popis veličín stanoviteľných z penetračnej skúšky



Obr. 11 Závislosť zaťaženie – posunutie razníka získaná z guľôčkovej penetračnej skúšky pri teplote 25°C

Na obr. 11 je uvedená typická závislosť zaťaženie – posunutie razníka z penetračnej skúšky. Graf môžeme rozdeliť do šiestich charakteristických oblastí podľa mechanizmov uplatňujúcich sa v jednotlivých častiach záznamu v priebehu skúšky [1]. Jednotlivé oblasti sú ohraničené inflexnými bodmi krivky záznamu.

Oblasť I

Pre danú oblasť je charakteristická lineárna odozva materiálu v priebehu zaťažovania. Uplatňuje sa mechanizmus elastickej deformácie, resp. mikroplastickej deformácie následkom vysokého počiatočného kontaktného napätia pod razníkom.

Oblasť II

V dôsledku rozširovania splastizovanej oblasti cez celý objem vzorky (plastický ohyb) dochádza v oblasti II k odklonu od lineárnej odozvy a k poklesu rýchlosti zaťažovania.

Oblasť III

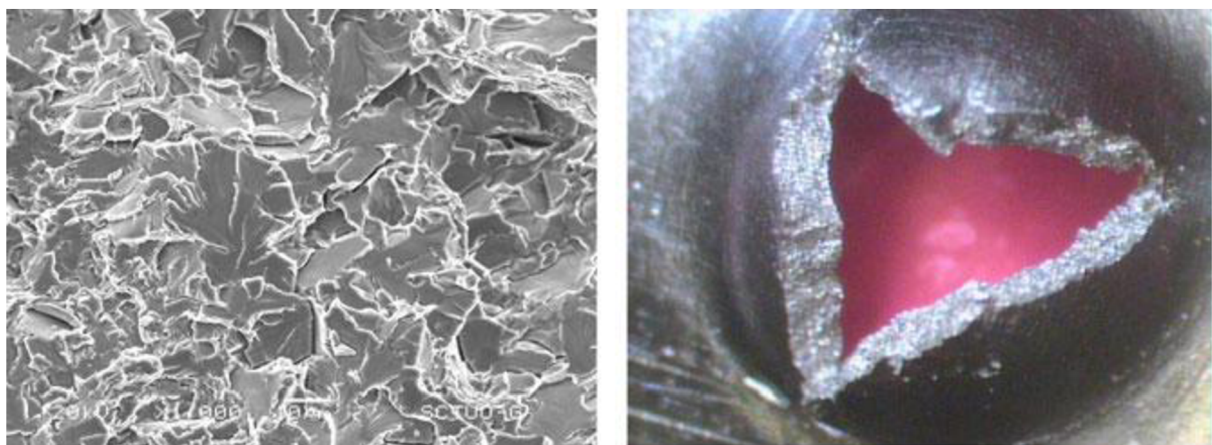
Začína sa prejavovať mechanizmus membránového preťahovania. Dochádza k deformačnému spevňovaniu materiálu, pričom oblasť je výrazná pri tvárnych materiáloch.

Oblasť IV

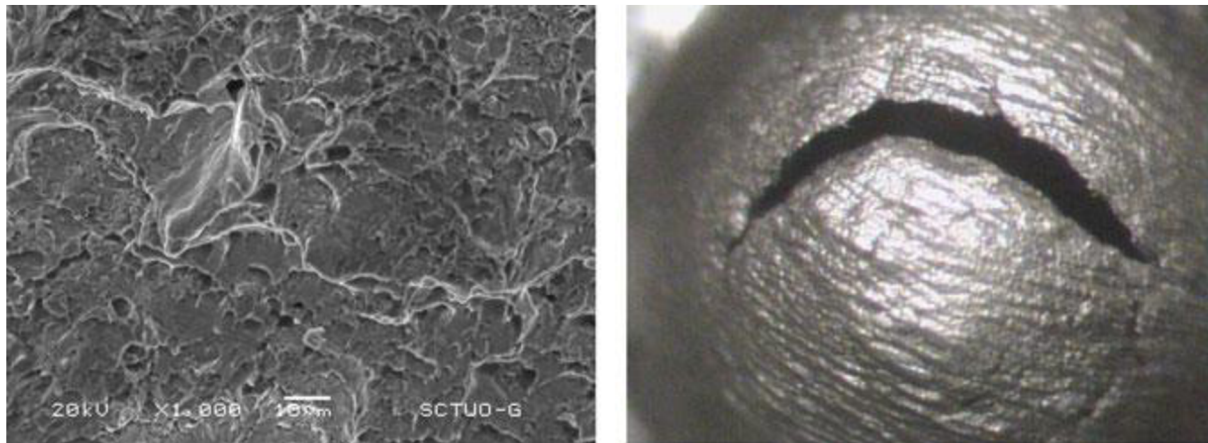
V dôsledku rozvoja hrdla pod razníkom a znižovania hrúbky skúšobnej vzorky pozorujeme postupné znižovanie sklonu závislosti. Oblasť IV končí bodom s najvyššou zaznamenanou silou v priebehu skúšky, kedy dochádza k vzniku lokálnej plastickej nestability a k iniciácii trhliny.

Oblasť V

Začína dochádzať k poklesu záťažnej sily, čo súvisí s iniciáciou a šírením trhliny. Materiál je plasticky nestabilný. Skúšobná vzorka začína mať podobu tzv. „klobúčika“. Koncom etapy dochádza k porušeniu skúšobnej vzorky. V závislosti na type skúšaného materiálu a teplote skúšania je možné pozorovať dva rozdielne typy porušenia vzoriek. Pre štepový mechanizmus porušovania je typický vznik trhliny v tvare tzv. „hviezdičky“ (obr. 12). Naopak, pre tvárny mechanizmus je charakteristické šírenie trhliny v tangenciálnom smere, resp. oddelenie materiálu skúšobnej vzorky v tvare tzv. „čapičky“ (viď obr. 13).



Obr. 12 Štepový mechanizmus porušovania, vzorka z ocele AE460 porušená pri teplote -140°C [15]



Obr. 13 Tvárny mechanizmus porušovania, vzorka z ocele AE460 porušená pri teplote -85°C [15]

Oblasť VI

V tejto oblasti zaznamenávame výrazný pokles záťažnej sily, tzv. dolom skúšobnej vzorky. Počiatok tejto oblasti je daný silou F_f (tzv. lomová sila), ktorá sa stanovuje zmluvne ako $F_f = 0,8 F_m$.

Zo získaného záznamu penetračnej skúšky (obr. 11) možno stanoviť charakteristické veličiny penetračnej skúšky, ktoré je následne možné prepočítať využitím rôznych techník na výsledky bežne používaných štandardných mechanických charakteristík [1, 8].

Veličiny, ktoré je možné stanoviť z penetračnej skúšky (viď obr. 11) [1, 8]

F_m [N] – maximálna hodnota sily získaná pri penetračnej skúške, sila na medzi pevnosti

u_m [mm] – posunutie razníka pri maximálnej sile F_m

F_f [N] – lomová sila, (zmluvne definovaná ako $F_f = 0,8 F_m$)

u_f [mm] – posunutie razníka v momente lomu skúšobnej vzorky pri lomovej sile F_f

F_e [N] – sila prechodu z elastickej do plastickej oblasti, sila na medzi klzu

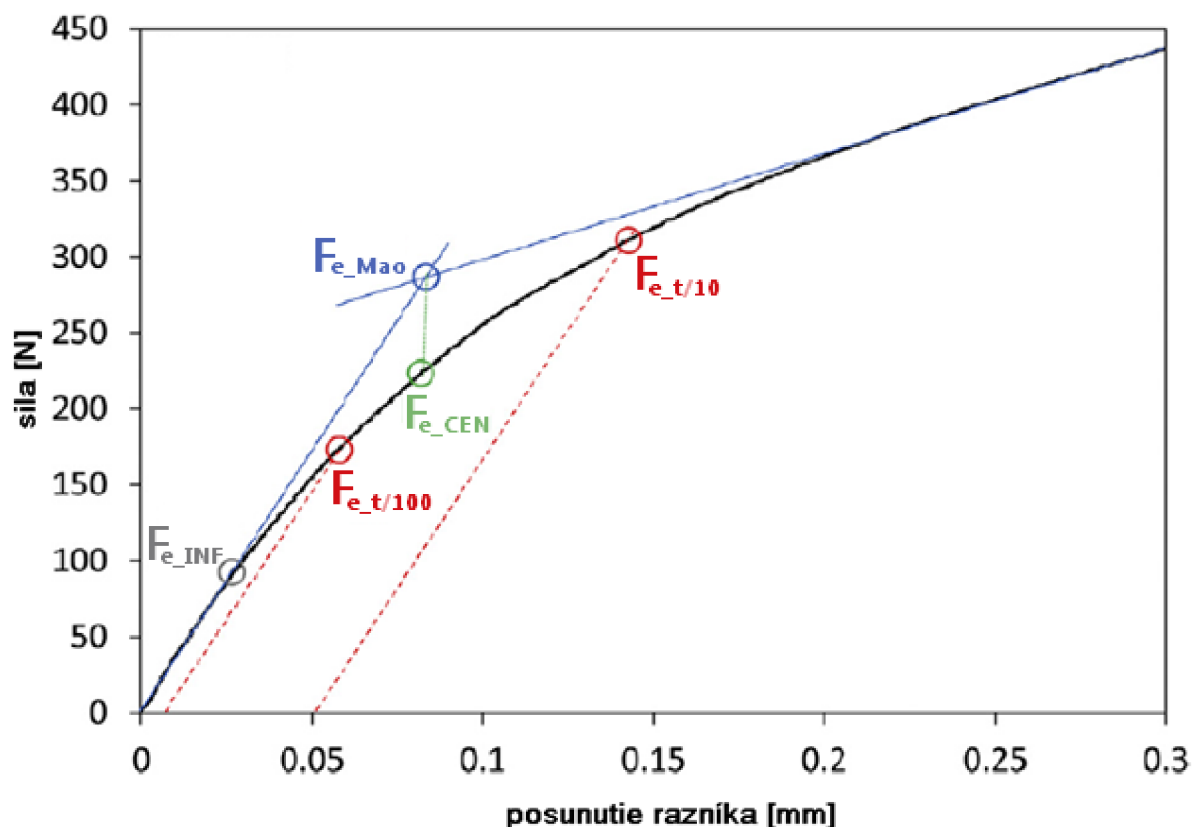
E^{SP} [J] – lomová energia (plocha pod krivkou závislosti *zťaženie – posunutie razníka*)

ε_f [-] – efektívna lomová deformácia (závisí na počiatkovej hrúbke vzorky h_0 a na minimálnej hrúbke porušenej vzorky h_f), $\varepsilon_f = \ln(h_0/h_f)$

Vyhodnotením teplotnej závislosti lomovej energie E^{SP} z viacerých záznamov penetračných skúšok vykonaných v teplotnom intervale pokrývajúcom tranzitnú oblasť je možné stanoviť tranzitnú teplotu T_{SP} .

T_{SP} [K] – tranzitná teplota penetračnej skúšky, definovaná ako teplota, ktorá odpovedá polovici súčtu najvyššej a najnižšej lomovej energie v tranzitnej oblasti

V prípade určenia hodnoty sily F_m zo závislosti *zťaženie - posunutie* razníka sila leží priamo v inflexnom bode krivky v mieste najvyššej zaznamenatej sily. V prípade stanovenia hodnoty sily F_e máme viacero možností, nakoľko za účelom jej stanovenia existuje niekoľko postupov (obr. 14) [11].



Obr. 14 Rôzne spôsoby stanovenia sily F_e , upravené podľa [11]

F_{e_Mao} : jedná sa o *metódu dvoch dotyčníc*, kde sila F_e je stanovená v mieste pretnutia dotyčníc ku krivke závislosti *zťaženie - posunutie* v oblastiach I a II.

F_{e_CEN} : úprava predchádzajúceho postupu, pričom hodnota sily F_e je stanovená v mieste priemetu sily F_{e_Mao} na krivku závislosti *zťaženie - posunutie*.

$F_{e_t/10}$, $F_{e_t/100}$: metóda zmluvného stanovenia sily F_e (tzv. *offset metóda*). Potrebne je skonštruovať dotyčnicu ku krivke závislosti v jej lineárnej oblasti a skonštruovať rovnobežku s posunutím $t/10$ alebo $t/100$ ($t = h_0$, tj. počiatočná hrúbka skúšobnej vzorky). Sila F_e je daná priesečníkom rovnobežky s krivkou závislosti *zťaženie - posunutie*.

F_{e_INF} : v literatúre je možné nájsť aj postup, kde sila F_e je stanovená v mieste odklonu priamky prekladajúcej lineárnu časť záznamu od zvyšku závislosti *zťaženie - posunutie*.

2.3 Technická dohoda CWA 15267, stav normalizácie skúšok SPT

Skúšanie na malých vzorkách využitím penetračných skúšok nie je dodnes normalizované. Skúšobné postupy pre vykonávanie skúšok tohto typu združuje len nižšia forma európskej normy – technická dohoda CWA 15267 - *Small Punch Test Method for Metallic Materials* [8] z roku 2007, čo je jedným s obmedzujúcich faktorov v jej intenzívnejšom rozširovaní. S cieľom posilniť túto dohodu s víziou budúcej normalizácie bývajú pravidelne organizované medzinárodné konferencie [2].

Samotná technická dohoda pozostáva z dvoch hlavných častí

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

Part A: A Code of Practice for Small Punch Creep Testing

popisuje vykonávanie penetračných skúšok pri zvýšených teplotách za uplatnenia creepového mechanizmu porušovania.

Popisované sú požiadavky na vykonanie creepových penetračných skúšok, konkrétne na

- skúšobné zariadenie,
- zariadenie pre ohrev,
- použité snímače,
- odporúčaný tvar a rozmery skúšobných vzoriek ($\varnothing 8$ mm, hrúbka 0,5 mm),
- inertnú atmosféru.

Skúšobné zariadenie býva súčasťou pece vyplnenej inertnou atmosférou, aby sa predošlo oxidácii vzoriek.

Prvá časť technickej dohody obsahuje dva dodatky [8]

- **ANNEX A1:** *Relationship to uniaxial creep test properties* – v dodatku ANNEX A1 prvej časti technickej dohody je možné nájsť vzťahy odvodené za účelom stanovenia konštantnej záťažnej sily penetračnej skúšky tak, aby bol dosiahnutý rovnaký čas do porušenia ako pri štandardných, tak aj miniatúrnych vzorkách. Ak by táto skutočnosť nebola splnená, nebolo by možné creepovú penetračnú skúšku korelovať so štandardnou creepovou skúškou.
- **ANNEX A2:** *Guidance on relevant technological issues: specimen sampling from components* – obsahuje popis zariadení využívaných k odberu materiálu zo zariadení. Spomínané sú výhodné oblasti aplikácie časovo závislých ale aj časovo nezávislých penetračných skúšok, materiálové parametre stanoviteľné z penetračných skúšok. Pojednávané je taktiež štatistické hľadisko, t. j. počet vzoriek a vykonaných skúšok k získaniu spoľahlivého výsledku. Spomína sa tu taktiež, že v prípade, že na zariadenie bývajú aplikované niektoré z nedeštruktívnych metód skúšania (NDT), napr. ultrazvuková skúška, ktorá vyžaduje rovný povrch (dobrú kvalitu povrchu), môže byť vplyvom odberov materiálu pre penetračné skúšky znemožnené ich vykonanie v miestach odberov.

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

Zaoberá sa postupom vykonania časovo nezávislých penetračných skúšok pri izbovej, zníženej aj zvýšenej teplote (bez uplatnenia creepu). Postupy boli pôvodne vyvíjané pre kovové materiály, všeobecne sú však použiteľné aj pre ďalšie materiály.

Popisované sú požiadavky na vykonanie časovo nezávislých penetračných skúšok, konkrétne na

- skúšobné zariadenie,
- zariadenie pre ohrev, resp. chladenie,
- použité snímače,
- odporúčaný tvar a rozmer skúšobných vzoriek ($\varnothing 8$ mm, hrúbka 0,5 mm),
- rýchlosť zaťažovania (0,2 – 2) mm/min. .

Zo získaného záznamu časovo nezávislej penetračnej skúšky sú stanovované charakteristické veličiny penetračnej skúšky (viď kapitolu 2.2), ktoré sú rôznymi postupmi prepočítavané na štandardne používané materiálové parametre. Sú to postupy založené na hľadaní empirických korelačných vzťahov, prípadne využití matematického modelovania s využitím metódy konečných prvkov (MKP).

Druhá časť technickej dohody obsahuje taktiež dva dodatky [8]

- **ANNEX B1:** *Derivation of tensile and fracture material properties* – súčasťou dodatku je prehľad postupov použiteľných k prepočtu charakteristických veličín penetračných skúšok na hodnoty štandardných materiálových parametrov.
- **ANNEX B2:** *Guidance on relevant technological issues: specimens sampling from components* – obsah dodatku je totožný s obsahom dodatku ANNEX A2 z prvej časti technickej dohody.

2.3.1 Prednosti a vhodné oblasti aplikácie penetračných skúšok

Penetračné skúšky s využitím miniatúrnych skúšobných vzoriek je vhodné aplikovať všade tam, kde je potrebné sledovať stav dlhodobo prevádzkovaných zariadení vysokej dôležitosti a významu pri nedostatku skúšobného materiálu alebo vysokých nákladoch a technologických problémoch spojených s vykonávaním štandardných materiálových skúšok, ktoré vyžadujú odber veľkého objemu materiálu. S výhodou je možné ich využívať k odhadu zostatkovej životnosti a na sledovanie zmeny materiálových parametrov konštrukcií a zariadení v priebehu prevádzky, obzvlášť, ak hodnoteniu podlieha vždy ten istý (podobný) typ materiálu, ideálne ten istý materiál. Súvisí to s tým, že pre získanie spoľahlivého výsledku je väčšinou potrebné stanoviť korelačné vzťahy vždy pre charakteristickú skupinu materiálov, ideálne pre konkrétny skúšaný materiál. Využitím všeobecných korelačných vzťahov je väčšinou možné dosiahnuť len obmedzenej presnosti získaných výsledkov [1, 4, 5, 6].

Z uvedeného vyplýva, že penetračné skúšky by mohli byť dobre uplatniteľné aj v aplikáciách s potrebou sériovej kontroly výrobkov, prípadne polotovarov z rovnakého materiálu, resp. z malej skupiny neustále sa obmieňajúcich materiálov, napr. vo výstupnej kontrole v priemyselných podnikoch ako náhrada ťahových skúšok. Za účelom prepočtu na hodnoty

štandardných materiálových parametrov môžu slúžiť dopredu stanovené prepočtové rovnice. Pri vhodnej voľbe miesta odberu alebo následnom konečnom opracovaní (výrobku, polotovaru) to prináša možnosť overiť základné mechanické vlastnosti všetkých kusov série, ak by sa jednalo napríklad o životne dôležité bezpečnostné komponenty (napr. po tepelnom spracovaní). Nakoľko pre vykonanie penetračných skúšok je možné využiť univerzálny ťahový stroj s využitím skúšobného prípravku, ktorý je možno svojpomocne zhotoviť, prípadne zakúpiť, z hľadiska zriaďovacích nákladov by mohol byť podobný typ kontroly pre niektoré špecifické priemyselné podniky a aplikácie zaujímavý.

Penetračné skúšky nachádzajú využitie napr. v energetickom priemysle pri sledovaní stavu radiačného krehnutia vplyvom dlhodobého vystavenia konštrukčných materiálov dôležitých komponentov jadrových elektrární ionizujúcemu žiareniu a tepelnému starnutiu [4, 9].

Uplatnenie môžu penetračné skúšky nájsť tiež v chemickom, vojenskom, či leteckom priemysle, nakoľko je prostredníctvom časovo závislých penetračných skúšok možné hodnotiť aj creepovú odolnosť materiálov [1, 5, 6, 9].

Penetračná skúška je považovaná za nedeštruktívnu, resp. kvazideštruktívnu metódu skúšania, z čoho vyplýva, že následné opravy zariadení po odberoch materiálu nie sú potrebné [1, 4].

Vzhľadom k vhodnej geometrii vzoriek môžu byť penetračné skúšky vhodným nástrojom pre hodnotenie tepelne ovplyvnených zón (TOZ) [4, 20].

2.3.2 Obmedzenia penetračných skúšok

Niektoré závery experimentov konštatujú, že využitím penetračných skúšok nie je možné dostatočne presne stanoviť medzu klzu R_e [12]. Súvisí to najmä so skutočnosťou, že charakteristickú silu z penetračnej skúšky F_e , ktorá je následne korelovaná na medzu klzu R_e väčšinou nie je možné stanoviť jednoznačne. Na jej určenie existuje viacero postupov podľa obr. 14.

Závery mnohých prác [11, 20] konštatujú, že z výsledkov penetračných skúšok nie je možné spoľahlivo získať hodnoty konvenčnej ťažnosti A .

Ako bolo spomínané v predchádzajúcej podkapitole 2.3.1, pre získanie spoľahlivých výsledkov s výbornou zhodou so štandardnými skúškami je väčšinou potrebné stanoviť korelačné vzťahy pre konkrétny skúšaný materiál. Navyše z dôvodu neexistencie platnej normy existuje v súčasnosti viacero geometrií ako skúšobných vzoriek (tvar a hrúbka h_0), tak aj skúšobných prípravkov (polomer razníka r , priemer D spodnej matrice prípravku). Počítať preto treba s tým, že získaná závislosť *zaťaženie – posunutie* a tým pádom aj charakteristické veličiny penetračných skúšok sú výrazne ovplyvnené spomínanými parametrami, čo treba brať do úvahy pri stanovovaní prepočtových (korelačných) rovníc [1, 23].

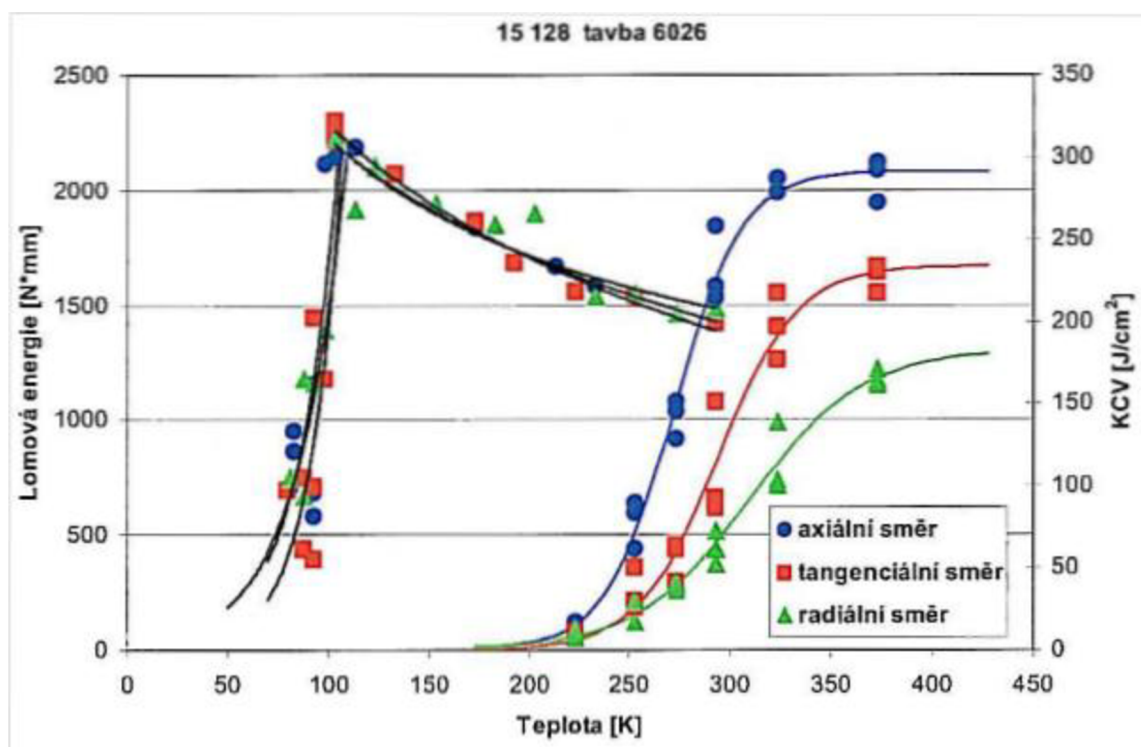
Tento problém je možné vyriešiť použitím vždy rovnakej geometrie skúšobných vzoriek, rovnakej geometrie skúšobného prípravku a taktiež dodržaním konzistencie ďalších skúšobných parametrov ako je teplota (nie v prípade určovania teplotnej závislosti), či rýchlosť zaťažovania, ktoré majú na výslednú závislosť taktiež významný vplyv [23, 24].

Z vyššie uvedených skutočností vyplýva, že penetračné skúšky nie sú úplne ideálnym nástrojom k hodnoteniu materiálových parametrov v prevádzkach, kde je často potrebné hodnotiť nové typy materiálov.

Za určité obmedzenie možno taktiež považovať vysoké nároky na kvalitu prípravy skúšobných vzoriek. Požadovaná je vysoká presnosť hrúbky vzoriek, vysoké požiadavky na rovnobežnosť skúšaných povrchov a v neposlednom rade taktiež na kvalitu povrchov vzorky (vyleštený povrch). To súvisí s vysokým úsilím a nákladmi pri ich príprave.

Bolo zistené [16], že kvalita povrchu vzoriek má výrazný vplyv najmä na maximálne zaťaženie stanovené pri penetračnej skúške F_m a na odpovedajúce posunutie pri tejto sile u_m . Z toho plynie aj potreba zabezpečenia konzistencie kvality pripravených skúšobných vzoriek.

Taktiež bol skúmaný vplyv orientácie skúšobných telies pre penetračné skúšky na teplotnú závislosť lomovej energie, ktorá je potrebná pre stanovenie tranzitnej teploty T_{SP} (teplota odpovedajúca polovici súčtu najvyššej a najnižšej lomovej energie v tranzitnej oblasti). Existuje totiž známy vplyv (obr. 15 vpravo) orientácie skúšobných telies na hodnoty materiálových parametrov stanovených prostredníctvom štandardných skúšok (napr. nárazovej práce, tým pádom aj tranzitnej teploty) [1].



Obr. 15 Vplyv orientácie štandardných vzoriek pre skúšky rázom v ohybe na získanú teplotnú závislosť nárazovej práce (vpravo) a orientácie vzoriek pre penetračné skúšky na závislosť lomovej energie (vľavo) na oceli 15 128 [1]

V prípade vzoriek pre penetračné skúšky na oceli 15 128 Matocha túto závislosť nezistil (obr. 15 vľavo) [1].

Existujú však aj práce, napr. [13], kde táto závislosť na orientácii skúšobných vzoriek pre penetračné skúšky pozorovaná bola. Skúšobným materiálom v tomto prípade bola hliníková zliatina 2024 vyrobená technológiou ECAP (*Equal Channel Angular Pressing*).

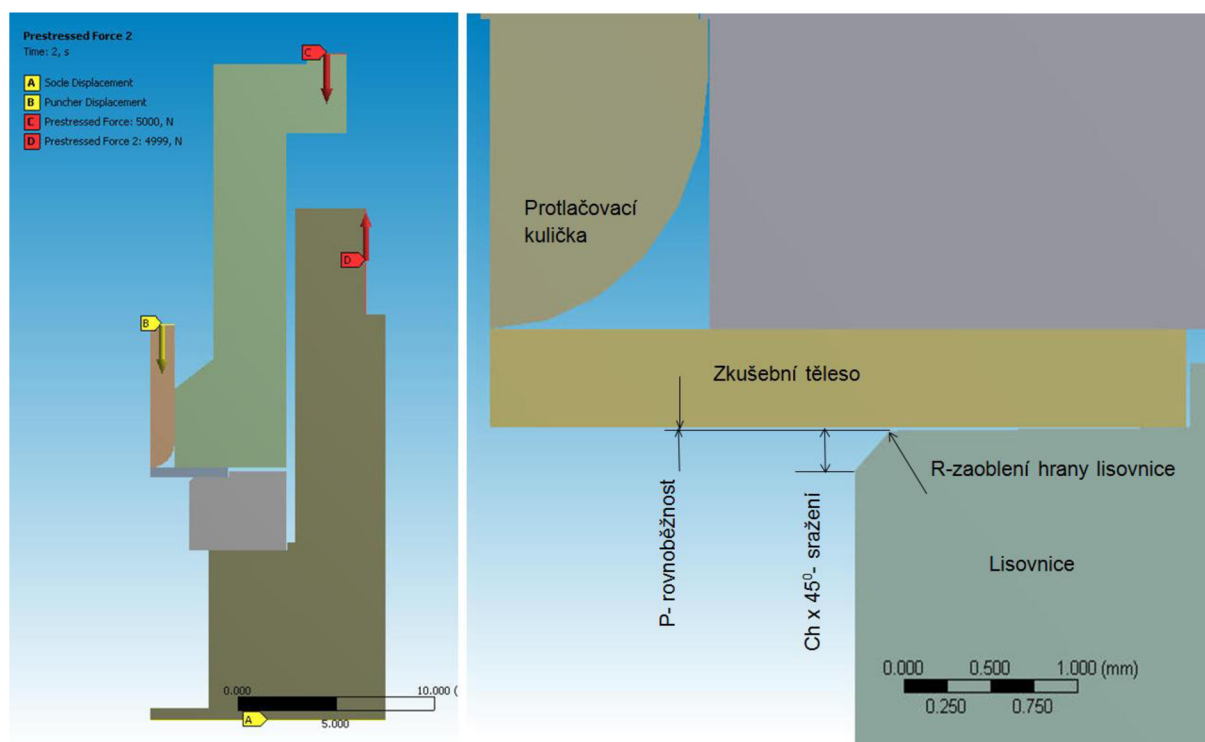
Skúšobný materiál je s využitím odberového zariadenia *SSamTM-2* odoberaný vždy v smere rovnobežnom s povrchom. Naskytuje sa problém, k výsledkom akej orientácie štandardných vzoriek je treba výsledky penetračných skúšok vzťahovať [1, 8].

V práci [17] bol skúmaný vplyv mikrodefektov na skúšobných vzorkách pre penetračné skúšky na získanú závislosť *zaťaženie – posunutie*. Z analýzy danej práce vyplýva, že vplyv mikrodefektov má najväčší vplyv na silu F_m (maximálne zaťaženie pri penetračnej skúške) a má len zanedbateľný vplyv na stanovenie sily F_e (sila na medzi klzu pri penetračnej skúške).

2.4 Vplyv externých faktorov na výsledky penetračných skúšok

Za účelom posúdenia vplyvu rôznych parametrov penetračnej skúšky na získané výsledky boli v práci [23] vykonané simulácie na oceli P92 metódou konečných prvkov (MKP). Model materiálu ocele P92 je daný modulom pružnosti $E = 210$ GPa, Poissonovým číslom $\mu = 0,3$ a závislosťou skutočného napätia na skutočnej pomernej plastickej deformácii zo záznamu skutočnej ťahovej skúšky. Skúmané boli vplyvy priemeru pretlačanej guľôčky, hrúbky skúšobnej vzorky, vplyv súčiniteľa trenia, skosenia (resp. rádiusu) spodnej matrice a ďalších parametrov, viď obr. 16.

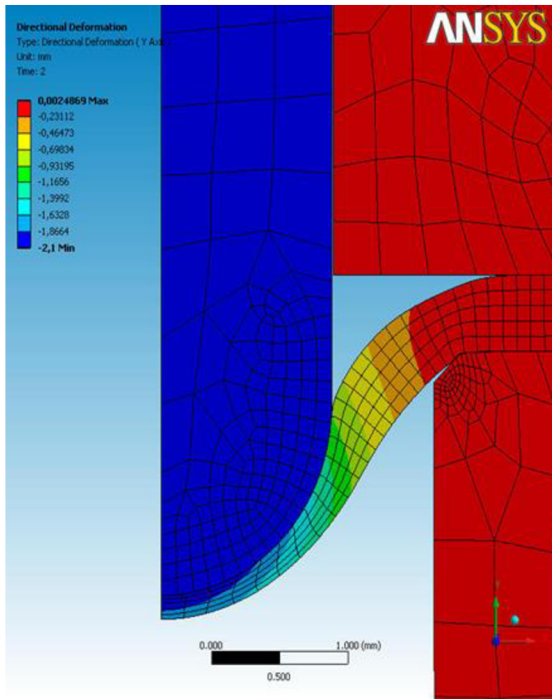
Bol vytvorený geometrický 2D model skúšobného prípravku s využitím symetrie vzhľadom k zvislej osi prípravku, časti prípravku boli namodelované ako tuhé telesá. Trenie medzi jednotlivými časťami modelu sa pohybuje v intervale súčiniteľa trenia $f = (0,07-0,2)$. Usporiadanie použitého geometrického modelu v systéme ANSYS je zrejmé z obr. 16 [23].



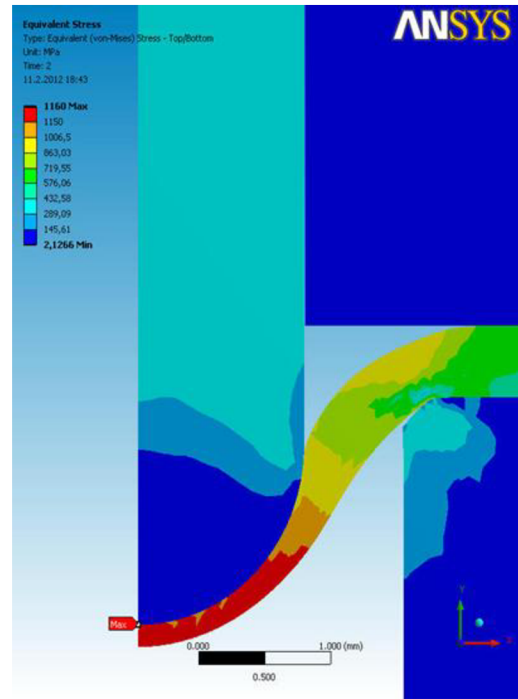
Obr. 16 Usporiadanie geometrického modelu v systéme ANSYS [23]

Ako vyplýva z obr. 16, upnutie skúšobnej vzorky (disk s priemerom 8 mm a hrúbkou 0,5 mm) je realizované aplikáciou síl C a D na telesá matric. Na razník je aplikované posunutie B realizované po malých krokoch až do limitnej hodnoty posuvu.

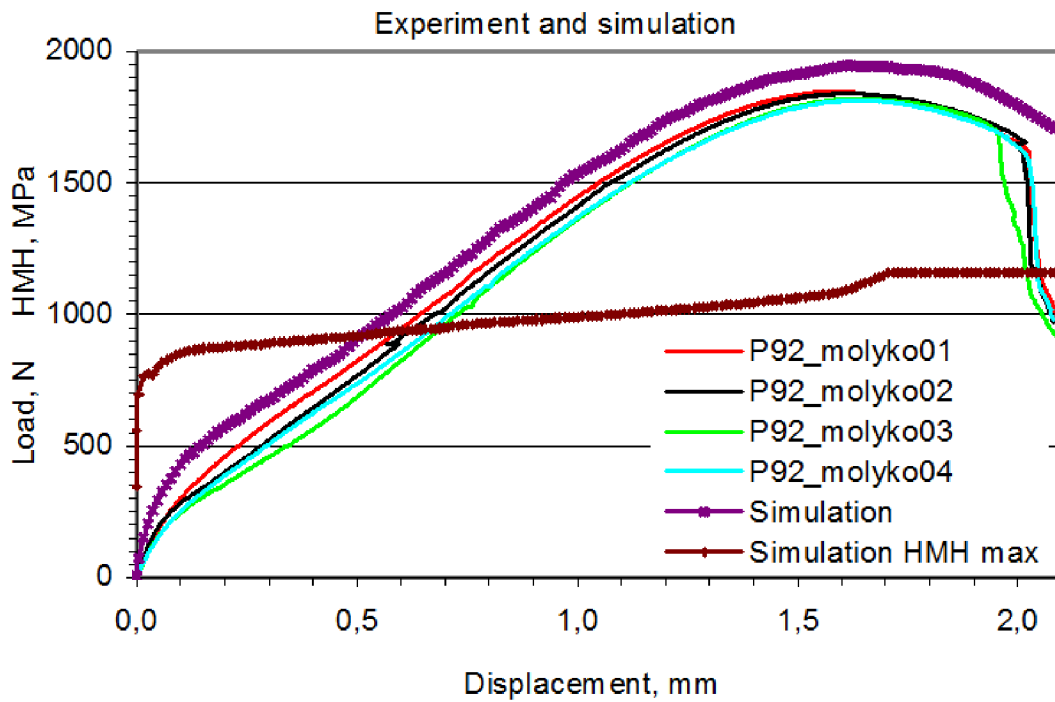
Celková deformácia a rozloženie Von Misesovho napätia v konečnej etape penetračnej skúšky (na konci penetračnej skúšky) sú zrejmé z obr. 17 a obr. 18.



Obr. 17 Deformácia v konečnej etape penetračnej skúšky [23]



Obr. 18 Rozloženie Von Misesovho napätia v konečnej etape penetračnej skúšky [23]



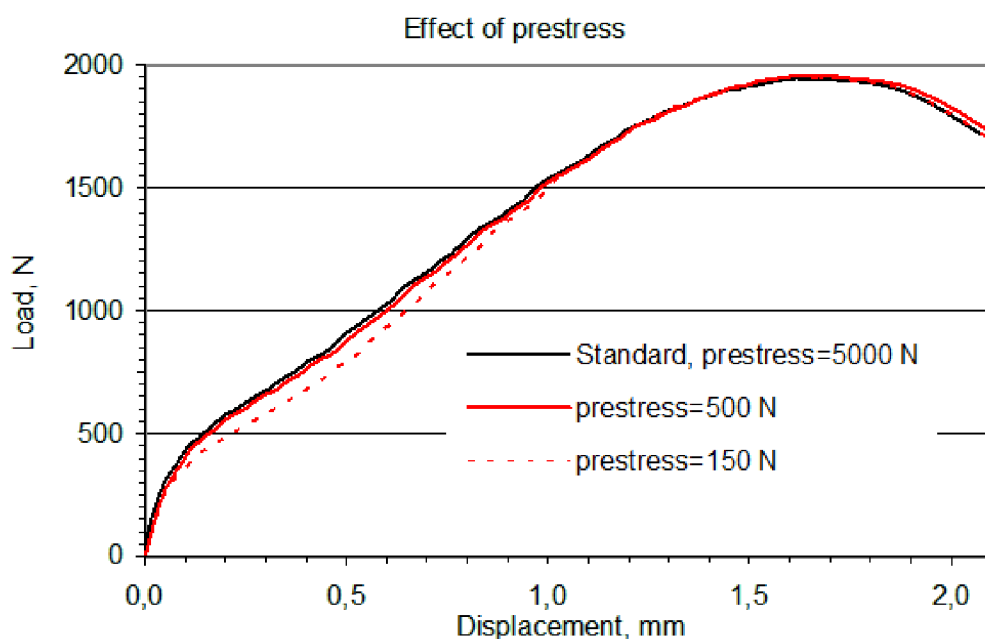
Obr. 19 Závislosti zaťaženie – posunutie razníka stanovené simuláciami MKP a experimentálne [23]

Závislosti *zaťaženie - posunutie* stanovené simuláciami penetračnej skúšky spolu s experimentálne stanovenými závislosťami (P92_molyko01 až P92_molyko04) sú pre porovnanie uvedené na obr. 19. Je zrejme, že maximálna sila F_m simulovanej penetračnej skúšky je o 5 % väčšia v porovnaní s experimentálne stanoveným záznamom a mierne sa líši aj hodnota posunutia u_m pri maximálnej sile F_m pre simulovanú a experimentálne stanovenú závislosť.

K pomerne značnej odchýlke simulovanej závislosti od závislosti stanovenej experimentálne dochádza v počiatočnej fáze penetračnej skúšky, v oblasti elastických deformácií. Bol skúmaný vplyv vytipovaných parametrov za účelom objasnenia tejto odchýlky [23].

Vplyv veľkosti fixačnej sily skúšobnej vzorky

Bol skúmaný vplyv fixačnej sily skúšobnej vzorky v intervale (150-5000) N, vid' obr. 20. Bolo zistené, že pri malej hodnote fixačnej sily dochádza k zníženiu zaznamenaných síl v počiatočnej fáze penetračnej skúšky do posunutia razníka asi 1,3 mm a taktiež dochádza k zaznamenaniam mierne vyšších síl od posunutia razníka 1,5 mm. Od hodnoty fixačnej sily približne 500 N, má hodnota fixácie vzorky len zanedbateľný vplyv na výslednú závislosť *zaťaženie – posunutie* razníka [23].

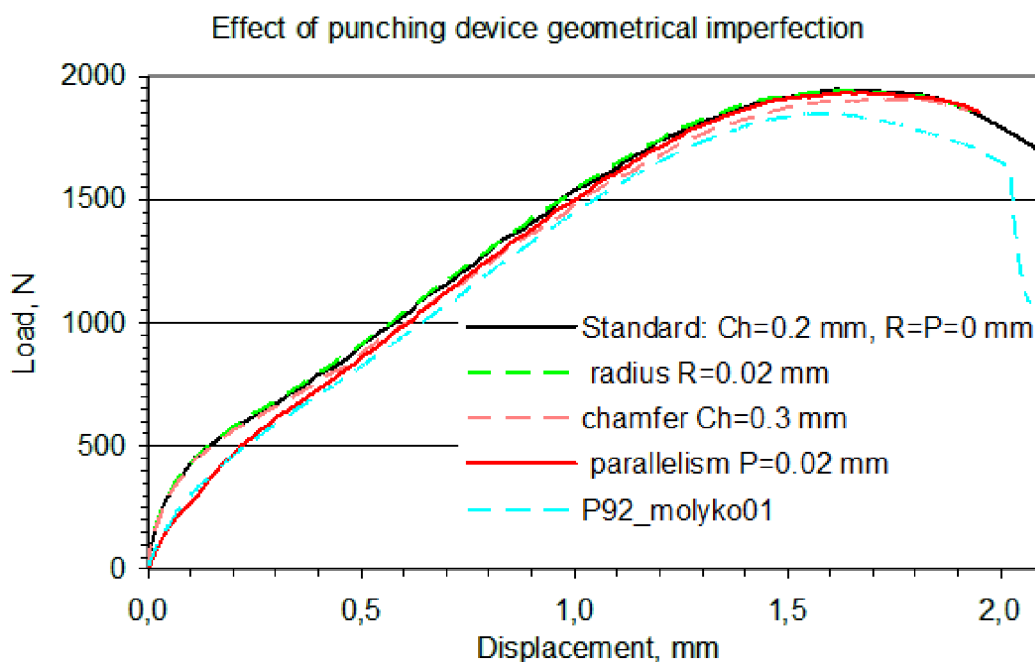


Obr. 20 Vplyv veľkosti fixačnej sily skúšobnej vzorky na výslednú závislosť *zaťaženie – posunutie* razníka [23]

Vplyv odchýlok geometrie spodnej matrice a skúšobných vzoriek

Bol skúmaný vplyv geometrických nepresností v konštrukcii skúšobného prípravku, resp. geometrických nepresností skúšobných vzoriek, najmä rovnobežnosti ich povrchov. Vplyv týchto parametrov (odchýlok) na výslednú závislosť *zataženie – posunutie* razníka je zrejmý z obr. 21. Možno konštatovať, že malá hodnota zaoblenia hrany skosenia má len minimálny vplyv na výslednú závislosť. Avšak hodnota zrazenia spodnej matrice Ch a odchýlka od rovnobežnosti dosadacej plochy skúšobnej vzorky P (tým pádom taktiež odchýlka od rovnobežnosti povrchov vzorky) má na závislosť *zataženie – posunutie* pomerne významný vplyv [23]. Zväčšenie hodnoty zrazenia Ch o desatinu mm má za následok mierne zníženie hodnoty zaznamenatej sily takmer v priebehu celej skúšky. V prípade odchýlky od rovnobežnosti dosadacej plochy vzorky spodnej matrice P možno konštatovať, že aj pri malej hodnote odchýlky ($P = 0,002$ mm), dochádza k pomerne výraznému ovplyvneniu výslednej závislosti. Podobná skutočnosť sa dá očakávať aj vplyvom odchýlok od rovnobežnosti povrchov skúšobných vzoriek.

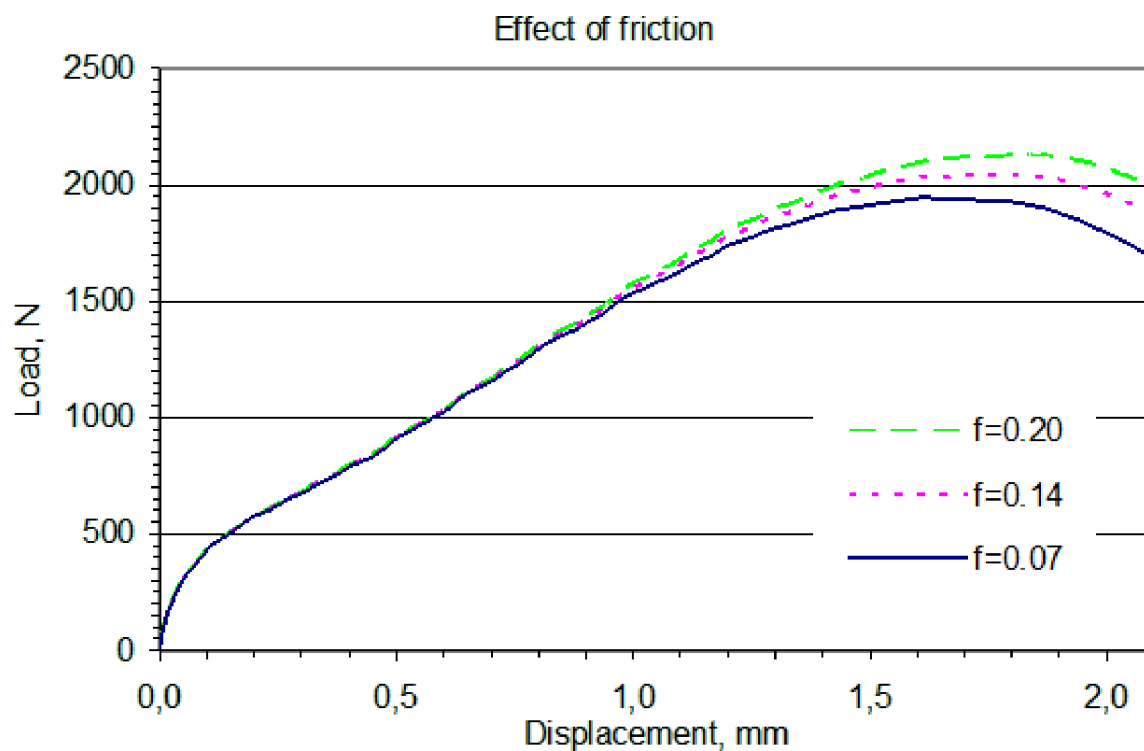
Vplyv odchýlky od rovnobežnosti P na výslednú závislosť *zataženie – posunutie* (obr. 21) sa charakterom veľmi podobá odchýlke medzi závislosťou získanou simuláciou MKP a závislosťami stanovenými experimentálne, obr. 19. Z toho možno usudzovať, že uvedená odchýlka na obr. 19 môže byť následkom práve nedokonalnej rovnobežnosti povrchov vzoriek a dosadacej plochy vzorky spodnej matrice [23].



Obr. 21 Vplyv geometrických nepresností spodnej matrice skúšobného prípravku na výslednú závislosť *zataženie – posunutie* razníka [23]

Vplyv trenia

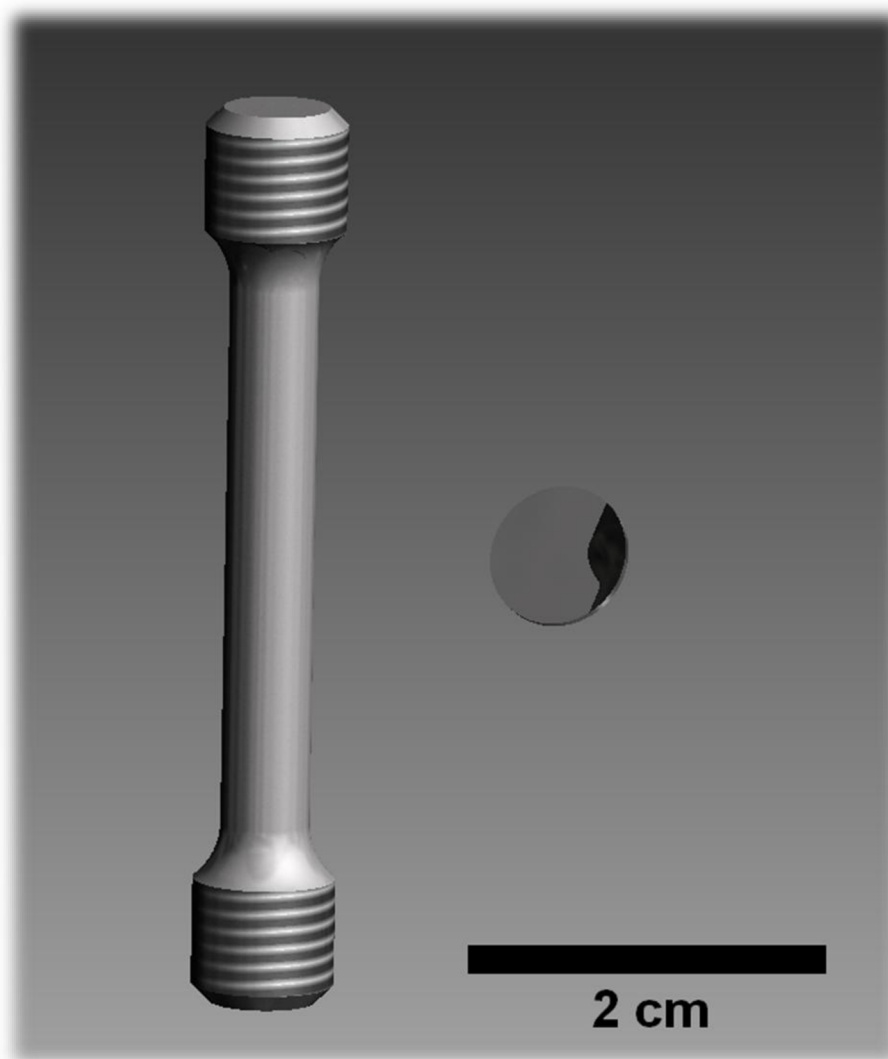
Vplyv hodnoty koeficientu trenia f medzi skúšobným prípravkom a skúšobnou vzorkou je zrejmý z obr. 22. Nárast hodnoty koeficientu trenia f má za následok pomerne významný nárast zaznamenaných hodnôt sily od hodnoty posunutia razníka približne 0,75 mm. Hodnota koeficientu trenia f má podľa zistení taktiež vplyv na lokalizáciu porušenia skúšobnej vzorky [23].



Obr. 22 Vplyv hodnoty koeficientu trenia f na závislosť *zátáženie – posunutie* razníka [23]

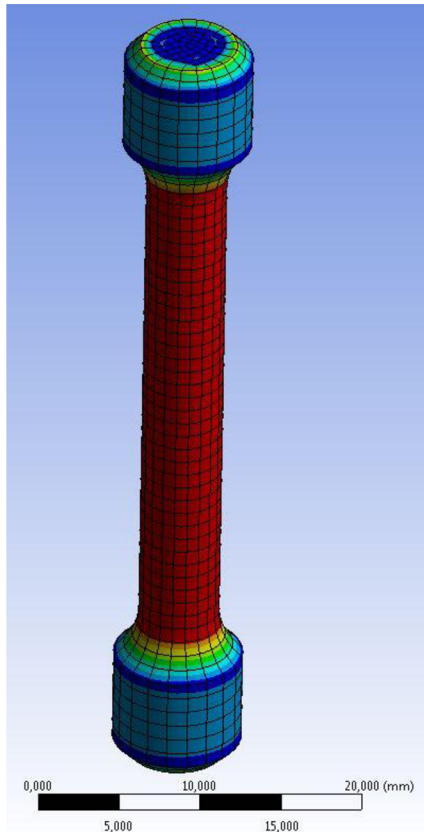
2.5 Porovnanie penetračnej a ťahovej skúšky

Okrem už viackrát spomínanej výhody, spočívajúcej v podstatne menšom objeme odoberaného materiálu potrebného k získaniu materiálových parametrov, čo dokumentuje obr. 23, treba počítať aj s ďalšími dôležitými odlišnosťami.

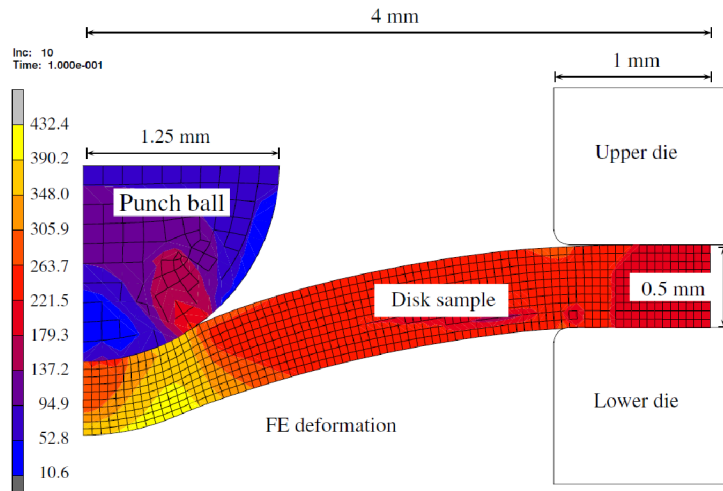


Obr. 23 Porovnanie vzorky pre skúšku ťahom (vľavo) a vzorky pre penetračnú skúšku (vpravo)

Na rozdiel od ťahovej skúšky, v priebehu ktorej je vzorka namáhaná jednoosým ťahovým namáhaním (obr. 24), v prípade penetračnej skúšky dochádza k namáhaniu tlakom pri stave viacosej napätosti (obr. 25).



Obr. 24 Rozloženie Von Misesovho napätia vo vzorke v priebehu skúšky ťahom



Obr. 25 Rozloženie Von Misesovho napätia vo vzorke v priebehu penetračnej skúšky [18]

Na rozdiel od (zmluvnej) skúšky ťahom, ktorej výstupom je najčastejšie závislosť *napätie – pomerné pretvorenie*, v prípade penetračnej skúšky je výstupom najčastejšie závislosť *zaťaženie – posunutie* razníka v osi zaťažovania.

3 STANOVENIE ŠTANDARDNÝCH MATERIÁLOVÝCH PARAMETROV Z ČASOVO NEZÁVISLÝCH PENETRAČNÝCH SKÚŠOK

Z výstupu penetračnej skúšky, zo závislosti *zataženie – posunutie razníka*, nie je možné priamo stanoviť konvenčne používané hodnoty materiálových parametrov ako medza klzu, medza pevnosti, či ťažnosť. Zo záznamu penetračnej skúšky sú najprv stanovené charakteristické veličiny (viď kapitolu 2.2), ktoré sú následne korelované na hodnoty štandardných materiálových parametrov. Zá týmto účelom sú najčastejšie využívané prepočtové vzťahy (buď všeobecné - stanovené pre skupinu charakteristických materiálov, alebo stanovené pre konkrétny materiál) [1, 4, 11].

V súčasnosti je možné za týmto účelom taktiež využiť metódu konečných prvkov (MKP). V tomto prípade je potrebné importovať dáta obsahujúce závislosť získanú pri penetračnej skúške (experimentálne určený materiálový model) do príslušného MKP softwaru a následne ho aplikovať na geometrický model vzorky ťahovej skúšky. Týmto postupom je možné taktiež získať hodnoty štandardných materiálových parametrov. To je však náročné na technické, programové a personálne vybavenie. Preto sa v inžinierskej praxi najčastejšie využíva metóda prepočtových vzťahov [17, 18, 22].

V literatúre [22] možno nájsť aj inovovaný prístup, kde autori s využitím multidimenzionálnej regresie odvodili empirický vzťah na priamy prepočet parametrov stanovených zo záznamu penetračnej skúšky na hodnoty štandardných mechanických charakteristík medze klzu R_e a medze pevnosti R_m .

V prípade v súčasnosti najčastejšie využívanej metódy prepočtových vzťahov sa jedná o stanovenie regresných parametrov priamky, ktorá prekladá súbor experimentálnych dát a je v tvare podľa rov. (1) [1, 11, 20]

$$Z = a \cdot \frac{Y}{X} + b, \quad (1)$$

kde pomer Y/X je tzv. normalizačný člen, Y je charakteristická sila zo záznamu *zataženie – posunutie* a X predstavuje tzv. porovnávaci parameter, ktorý zohľadňuje vplyv geometrie ako skúšobnej vzorky, tak aj samotného skúšobného prípravku. Koefficienty a , b sú regresné parametre priamky.

3.1 Prepočet parametrov získaných zo skúšky SPT na hodnotu medze klzu R_e

Za účelom prepočtu na medzu klzu R_e je potrebné najprv stanoviť silu F_e zo záznamu penetračnej skúšky. Za týmto účelom sú využívané viaceré postupy podľa obr. 14. Najčastejšie využívané porovnávacie parametre X v prípade prepočtu na medzu klzu R_e sú uvedené v tab. 1.

Tabuľka 1 Najčastejšie používané porovnávacie parametre X pri prepočte na medzu klzu R_e

Matocha a Purmenský [1, 11]	h_0^2
Mao a Takahashi [1]	
Norris a Parker [21]	$2,19h_0^2$

Bolo zistené, že medzi medzou klzu R_e a silou na medzi klzu penetračnej skúšky F_e podelenou druhou mocninou počiatkovej hrúbky vzorky existuje lineárny vzťah, rov. (2) a (3) [11].

Všeobecná rovnica má potom tvar

$$R_e = \alpha_1 \cdot \frac{F_e}{X} + \alpha_2, \quad (2)$$

častejšie sa však používa rovnica s porovnávacím parametrom h_0^2 v tvare

$$R_e = \alpha_1 \cdot \frac{F_e}{h_0^2} + \alpha_2, \quad (3)$$

kde α_1 a α_2 sú regresné parametre priamky, F_e je sila na medzi klzu pri penetračnej skúške a h_0 je počiatková hrúbka skúšanej vzorky. V prípade stanovenia regresných parametrov pre menšiu skupinu materiálov je vhodné sa držať fyzikálneho predpokladu, že pri nulovej sile F_e bude výsledné napätie R_e taktiež nulové, tj. priamka prechádza počiatkom súradníc, $\alpha_2 = 0$.

Prepočtové rovnice pre stanovenie medze klzu R_e ocelí z literatúry

Mao, Takahashi [25]:

$$R_e = 0,36 \cdot \frac{F_e}{h_0^2}, \quad (4)$$

Guan, Wang [1]:

$$R_e = 0,4847 \cdot \frac{F_e}{h_0^2} + 21,359. \quad (5)$$

Ďalšia rovnica (6) bola stanovená v [11] zahrnutím 15 ocelí s rôznymi mikroštruktúrami a pevnostnými hodnotami a jednej hliníkovej zliatiny s cieľom stanoviť široko použiteľný prepočtový vzťah pre kovové materiály

$$R_e = 0,346 \cdot \frac{F_{e-t/10}}{h_0^2}. \quad (6)$$

Bolo zistené [11, 15, 20], že použitím charakteristickej sily $F_{e-t/10}$ je možné dosiahnuť najlepšej presnosti prepočtu pre širší rozsah kovových materiálov. Autori to vysvetľujú tým, že stanovenie sily uvedeným postupom je menej subjektívne, nakoľko zahŕňa len preloženie lineárnej časti záznamu priamkou a konštrukciu rovnobežky vo vzdialenosti odpovedajúcej desatine počiatkovej hrúbky vzorky h_0 .

V práci [15] bola stanovená prepočtová rov. (7) pre oceľ AE460

$$R_e = 0,43 \cdot \frac{F_{e-t/10}}{h_0^2}. \quad (7)$$

3.2 Prepočet parametrov získaných zo skúšky SPT na hodnotu medze pevnosti R_m

V prípade prepočtu charakteristickej sily F_m získanej zo záznamu penetračnej skúšky na hodnotu medze pevnosti R_m je postup veľmi podobný ako v prípade prepočtu na medzu klzu. Rozdiel je len v tom, že je využívaných viacero porovnávacích parametrov X podľa rov. (1). Najčastejšie využívané porovnávacie parametre sú uvedené v tab. 2.

Tabuľka 2 Najčastejšie využívané porovnávacie parametre X pri prepočte na medzu pevnosti R_m

Mao a Takahashi [1]	h_0, h_0^2
Matocha a Purmenský [1, 11]	$h_0 \cdot u_m$
Parker a Norris [21]	$h_0^2 \cdot (4,38r - 0,9c + 0,56)$

V porovnávacom parametri Matochu a Purmenského sa okrem už vyššie spomínanej počiatkovej hrúbky skúšobnej vzorky h_0 vyskytuje aj parameter u_m , ktorý predstavuje posunutie razníka pri maximálnej sile zaznamenananej v priebehu penetračnej skúšky, pri charakteristickej sile F_m .

Porovnávací člen od Parkera a Norrisa obsahuje okrem počiatkovej hrúbky vzorky h_0 ešte aj parameter c , ktorý predstavuje rozdiel priemerov spodnej a hornej matrice a parameter r , ktorý predstavuje polomer razníka.

Všeobecná rovnica má potom tvar

$$R_m = \beta_1 \cdot \frac{F_m}{X} + \beta_2 , \quad (8)$$

kde β_1 a β_2 sú regresné parametre priamky a F_m predstavuje maximálnu silu zaznamenanú pri penetračnej skúške.

Podľa [11] existujú v súčasnosti stále dohady ohľadom vhodného porovnávacieho parametra X pri prepočte na medzu pevnosti R_m . Hoci sa v literatúre často objavuje parameter h_0^2 , vid' rov. (9), závery niektorých autorov naznačujú, že lepšie výsledky je možné získať použitím parametra h_0 , vid' rov. (10), kde však dochádza k stavu, že jednotky korelovaných veličín nie sú rovnaké. Ďalšou možnosťou, ktorú je možné nájsť v literatúre (napr. [2, 11]), je použitie porovnávacieho parametra ($h_0 \cdot u_m$), vid' rov. (11), s využitím ktorého je možné dosiahnuť taktiež dobrých výsledkov. Navyše sa v tomto prípade je možné vyhnúť spomínanému problému s nesúlalom jednotiek korelovaných veličín.

Najčastejšie používané prepočtové rovnice na medzu pevnosti R_m sú

$$R_m = \beta_1 \cdot \frac{F_m}{h_0^2} + \beta_2 , \quad (9)$$

$$R_m = \beta_1 \cdot \frac{F_m}{h_0} + \beta_2 , \quad (10)$$

$$R_m = \beta_1 \cdot \frac{F_m}{h_0 \cdot u_m} + \beta_2 , \quad (11)$$

kde β_1 a β_2 sú regresné parametre priamky, F_m je maximálna sila zaznamenaná pri penetračnej skúške podobne ako v prípade rov. (8), h_0 je počiatočná hrúbka vzorky a u_m je posunutie razníka pri maximálnej sile F_m .

Prepočtové rovnice pre stanovenie medze pevnosti R_m ocelí z literatúry

Mao, Takahashi [1]:

$$R_m = 0,130 \cdot \frac{F_m}{h_0^2} - 320 , \quad (12)$$

Guan, Wang [1]:

$$R_m = 0,0666 \cdot \frac{F_m}{h_0^2} + 146,03 , \quad (13)$$

Ďalšia rovnica [11]:

$$R_m = 0,277 \cdot \frac{F_m}{(u_m \cdot h_0)} . \quad (14)$$

Rovnica (14) bola navrhnutá zahrnutím 15 ocelí s rôznymi mikroštruktúrami a pevnostnými hodnotami a jednej hliníkovej zliatiny s cieľom stanoviť široko použiteľný prepočtový vzťah pre kovové materiály. Bolo zistené [11], že použitie normalizačného člena $(u_m \cdot h_0)$ umožňuje presnejší odhad medze pevnosti R_m z výsledkov penetračných skúšok.

3.3 Inovovaný prístup prepočtu parametrov z penetračnej skúšky na medzu klzu R_e a medzu pevnosti R_m pre ocele podľa [22]

V literatúre [22] je možné nájsť inovovaný postup k odhadu medze klzu R_e a medze pevnosti R_m z výsledkov penetračných skúšok ocelí.

Základom spomínaného postupu bola simulácia ťahových skúšok a penetračných skúšok modelových ocelí s využitím MKP. Získané poznatky o vzťahoch medzi materiálovými vlastnosťami a výsledkami penetračných skúšok boli využité pri štúdiu kauzálnych vzťahov medzi mechanickými vlastnosťami ocelí a výsledkami penetračných skúšok.

Vlastnosti modelových ocelí sú dané modulom pružnosti $E = 210$ GPa, Poissonovým číslom $\mu = 0,3$ a závislosťami skutočného napätia na skutočnej pomernej plastickej deformácii zo skutočných ťahových diagramov vytvorených použitím Holomonovho vzťahu

$$\sigma = k \cdot \overline{\varepsilon_p^n} , \quad (15)$$

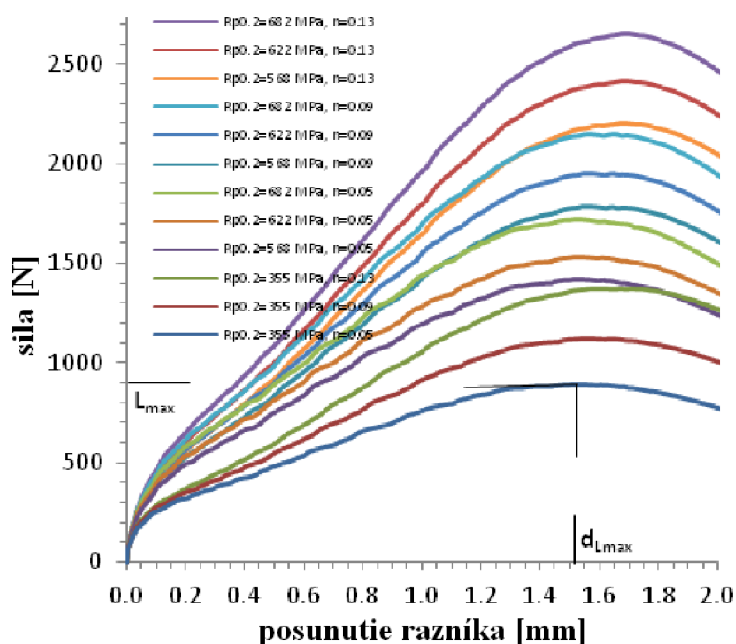
kde σ je skutočné napätie, $\overline{\varepsilon_p^n}$ je skutočná plastickej deformácia, k je koeficient deformačného spevnenia a n je exponent deformačného spevnenia.

Parametre Holomonovho vzťahu a mechanické vlastnosti modelových ocelí zo simulácií ťahových skúšok sú uvedenú v tab. 3.

Tabuľka 3 Parametre Holomonovho vzťahu a mechanické vlastnosti modelových ocelí [22]

k [MPa]	n [-]	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	Z [%]
931	0,05	682	761	19	74
1212	0,09	682	885	20	67
1530	0,13	682	1027	24	69
849	0,05	622	694	16	72
1105	0,09	622	806	20	68
1395	0,13	622	937	24	66
775	0,05	568	633	16	71
1010	0,09	568	737	21	68
1274	0,13	568	856	24	69
484	0,05	355	396	15	57
631	0,09	355	461	21	68
796	0,13	355	536	25	69

Záznamy penetračných skúšok modelových ocelí získané simuláciou prostredníctvom MKP sú na obr. 26.

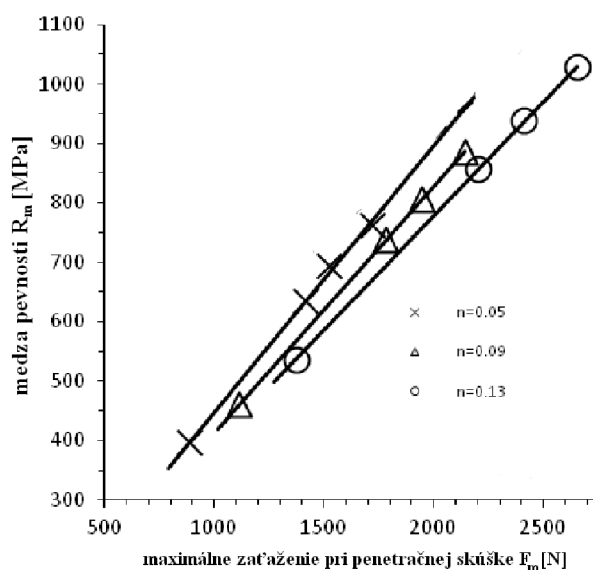


Obr. 26 Záznamy penetračných skúšok modelových ocelí získané numerickou simuláciou MKP [22]

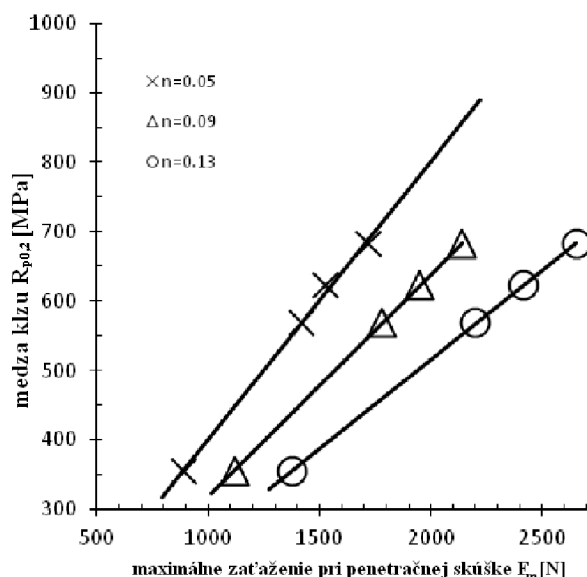
Analýzy vzťahov medzi štandardnými mechanickými vlastnosťami ocelí a výsledkami počítačových simulácií penetračných skúšok umožnili autorom formulovať spresnené postupy odhadov medze klzu R_e a medze pevnosti R_m ocel'ových materiálov z výsledkov penetračných skúšok.

Bolo zistené, že hodnoty medze pevnosti R_m a medze klzu R_e modelových ocelí vykazujú pre konštantné hodnoty exponentu spevnenia n lineárnu závislosť na maximálnom zaťažení

penetračnej skúšky F_m , pričom táto závislosť prechádza počiatkom súradnic. Uvedené skutočnosti dokumentujú obr. 27 a obr. 28.



Obr. 27 Závislosť medze pevnosti R_m na maximálnej sile penetračnej skúšky F_m pre rôzne hodnoty exponentu deformačného spevnenia n [22]



Obr. 28 Závislosť medze klzu $R_{p0.2}$ na maximálnej sile penetračnej skúšky F_m pre rôzne hodnoty exponentu deformačného spevnenia n [22]

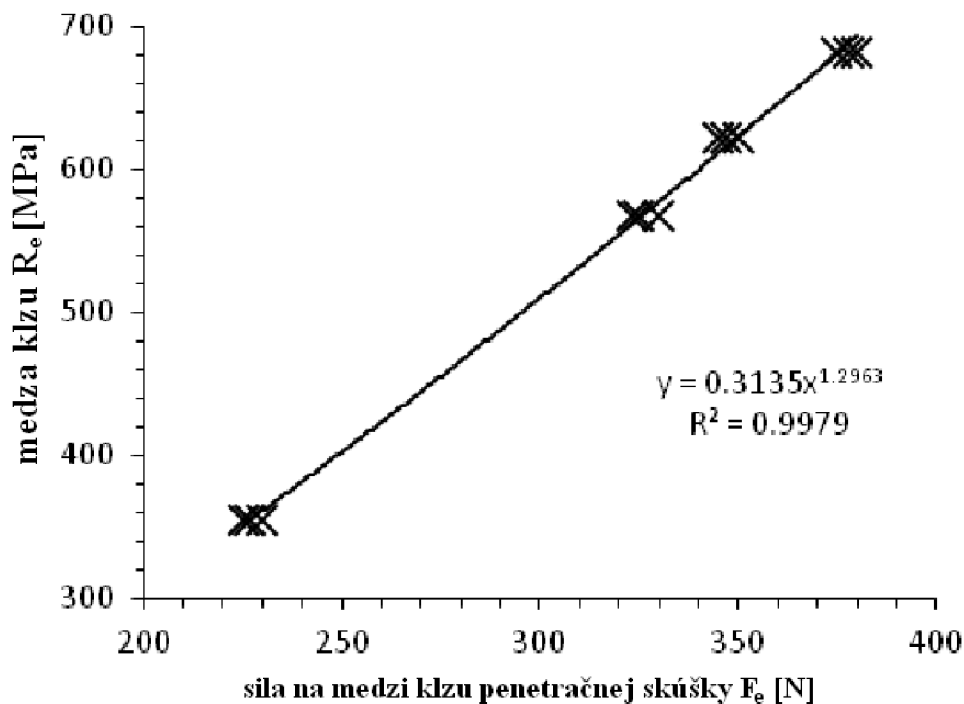
Na základe simulácií penetračných skúšok na oceliach s rozsahom medze klzu $R_e = (355-682)$ MPa a rozsahom medze pevnosti $R_m = (396-1027)$ MPa boli stanovené empirické vzťahy na stanovenie štandardných mechanických vlastností ocelí.

Autor vo svojej práci [22] navrhol dva postupy, pričom každý z nich používa trochu inú informačnú základňu a sú preto na sebe nezávislé:

1) Graficko – výpočetná metóda

Základom je stanovenie sily na medzi klzu penetračnej skúšky F_e podľa obr. 14 zo záznamu penetračnej skúšky. V článku je využívaný postup navrhnutý Maom (v práci označený F_{e_Mao}). Autor článku [22] konštatuje, že použitím štandardných lineárnych prepočtových rovníc vo tvare podľa rov. (1) je možné dosiahnuť dobrej presnosti korelácie len v oblasti väčších pevností. Existuje preto predpoklad, že tento lineárny vzťah bol navrhnutý pre oceľ s väčšou pevnosťou bez uvažovania spevnenia. Navrhnutý bol preto vzťah (viď tiež obr. 29)

$$R_e = 0,3135 \cdot F_e^{1,2963} . \quad (16)$$



Obr. 29 Stanovenie prepočtovej rovnice na medzu klzu R_e [22]

Treba však konštatovať, že korelované veličiny v rov. (16) nemajú rovnaké jednotky.

Medzu klzu R_e je možné stanoviť buď odčítaním z grafu na obr. 29, alebo výpočtom pomocou rov. (16). Následne je potrebné odhadnúť hodnotu exponentu spevnenia n zo závislosti medze klzu R_e na maximálnej sile z penetračnej skúšky F_m podľa obr. 28. Medzu pevnosti R_m potom môžeme stanoviť pomocou rovnice odvodenej z Holomonovho vzťahu [22]

$$R_m = R_e \cdot (500 \cdot n)^n / (n + 1) , \quad (17)$$

alebo odčítaním z grafu na obr. 27.

2) Vzťahy stanovené viacrozmernou lineárnou regresiou

Empirické vzťahy (18)-(23) stanovené viacrozmernou lineárnou regresiou pre odhad medze klzu R_e a medze pevnosti R_m z parametrov penetračných skúšok ocelí sú uvedené v tab. 4. Uvedené vzťahy boli stanovené na modelových oceliach z tab. 3.

Tabuľka 4 Empirické vzťahy stanovené viacrozmernou lineárnou regresiou k získaniu konvenčných hodnôt medze klzu R_e a medze pevnosti R_m dosadením parametrov z penetračných skúšok, upravené podľa [22]

function	Regression relations	R^2	rov. č.
linear	$R_e = 2753,2 - 1794,1 \cdot u_m + 0,36121 \cdot F_m$	0.926	(18)
	$R_m = 1126,9 - 732,80 \cdot u_m + 0,42931 \cdot F_m$	0.994	(19)
Quadratic without mixed-member	$R_e = 40448 - 49364 \cdot u_m + 14911 \cdot u_m^2 + 0,62184 \cdot F_m - 0,00008 \cdot F_m^2$	0.993	(20)
	$R_m = 16616 - 20312 \cdot u_m + 6143,3 \cdot u_m^2 - 0,04411 \cdot F_m - 0,00004 \cdot F_m^2$	0.999	(21)
Quadratic	$R_e = 33649 - 39736 \cdot u_m + 11493 \cdot u_m^2 + 0,67330 \cdot u_m \cdot F_m - 0,29960 \cdot F_m - 0,00012 \cdot F_m^2$	0.994	(22)
	$R_m = 12212 - 14077 \cdot u_m + 3929,8 \cdot u_m^2 + 0,43606 \cdot u_m \cdot F_m - 0,04411 \cdot F_m - 0,00001 \cdot F_m^2$	0.999	(23)

Autor článku [22] však pripomína potrebu overenia rozsahu platnosti týchto vzťahov, rov. (16)-(23), vykonaním ťahových a penetračných skúšok na oceliach s rôznymi hodnotami pevnosti a spevnenia.

3.4 Prepočet parametrov získaných zo skúšky SPT na hodnotu ťažnosti A

Využitím prepočtových rovníc na konvenčnú ťažnosť A dostávame vo všeobecnosti horšie výsledky.

V literatúre je možné nájsť vzťahy ktoré boli odvodené za účelom prepočtu parametrov z penetračnej skúšky na hodnoty konvenčnej ťažnosti A.

Fleury a Ha [19] odvodili lineárny vzťah

$$A = \gamma \cdot u_m, \quad (24)$$

kde γ predstavuje empirickú konštantu ($\gamma = 7$) a u_m je posunutie razníka pri maximálnej sile F_m zaznamenané v priebehu penetračnej skúšky.

V literatúre [11, 20] je možné taktiež nájsť rovnicu podľa Rodrigueza, ktorá obsahuje porovnávaci parameter h_0

$$A = \gamma' \cdot \frac{u_m}{h_0}, \quad (25)$$

kde γ' je empirický koeficient ($\gamma' = 14$). Hodnota tohto parametru je v zhode s meraniami autorov Fleury a Ha [19] v prípade, že uvažujeme počiatočnú hrúbku vzorky $h_0 = 0,5$ mm.

Prepočtové rovnice pre stanovenie ťažnosti A ocelí z literatúry

V práci [11] autori stanovili 2 rovnice

$$A = 12,57 \cdot u_m, \quad (26)$$

$$A = 6,07 \cdot \frac{u_m}{h_0}, \quad (27)$$

kde u_m je posunutie razníka pri maximálnom zaťažení a h_0 je počiatočná hrúbka vzorky. Na základe hodnoty koeficientu determinácie R^2 autori práce [11] usudzujú, že ani jedna z rov. (26) a (27) nie je s dostatočnou presnosťou schopná odhadnúť hodnotu ťažnosti A ocelí.

3.5 Prepočet hodnoty tranzitnej teploty T_{SP} na hodnotu tranzitnej teploty $FATT$

Tranzitné správanie sa v oblasti materiálového inžinierstva definuje ako zmena mechanizmu porušovania materiálov v závislosti na teplote. Častokrát je tento stav vyjadrený ako prechod z húževnatého lomu na lom krehký s klesajúcou teplotou. Tento jav je typický pre kovové materiály s kryštalickou mriežkou BCC (*body centered cubic*).

Hodnotenie odolnosti materiálu z hľadiska odolnosti voči krehkému lomu je realizované sledovaním posunu tranzitných kriviek. Kvantifikácia tejto skutočnosti je vyjadrená zmenou tranzitných teplôt.

Pre hodnotenie tranzitného správania materiálov z výsledkov penetračných skúšok bola zavedená tranzitná teplota T_{SP} . Definujeme ju ako teplotu odpovedajúcu polovici súčtu minimálnej a maximálnej lomovej energie E^{SP} (plocha pod krivkou záznamu penetračnej skúšky) v tranzitnej oblasti.

Tranzitná teplota T_{SP} býva štandardne korelovaná s tranzitnou teplotou $FATT$ (tranzitná teplota odpovedajúca 50% tvárneho lomu na lomovej ploche).

Najčastejšie využívané tvary prepočtových rovníc medzi T_{SP} a $FATT$ [1, 8]

$$FATT = a \cdot T_{SP}, \text{ kde } a = 0,35 \text{ až } 0,44, \quad (28)$$

$$FATT = b \cdot T_{SP} + \beta, \quad (29)$$

$$FATT = \frac{C}{(T_{SP})^2}, \quad (30)$$

kde b , β , C sú regresné parametre.

Väčšinou je možné stanoviť lineárny vzťah medzi teplotou T_{SP} a $FATT$, vid' rov. (28) a (29). Všeobecne však závislosť $FATT$ na T_{SP} pre väčší interval teplôt lineárna byť nemusí. V tom prípade je možné využiť tvar prepočtovej rov. (30).

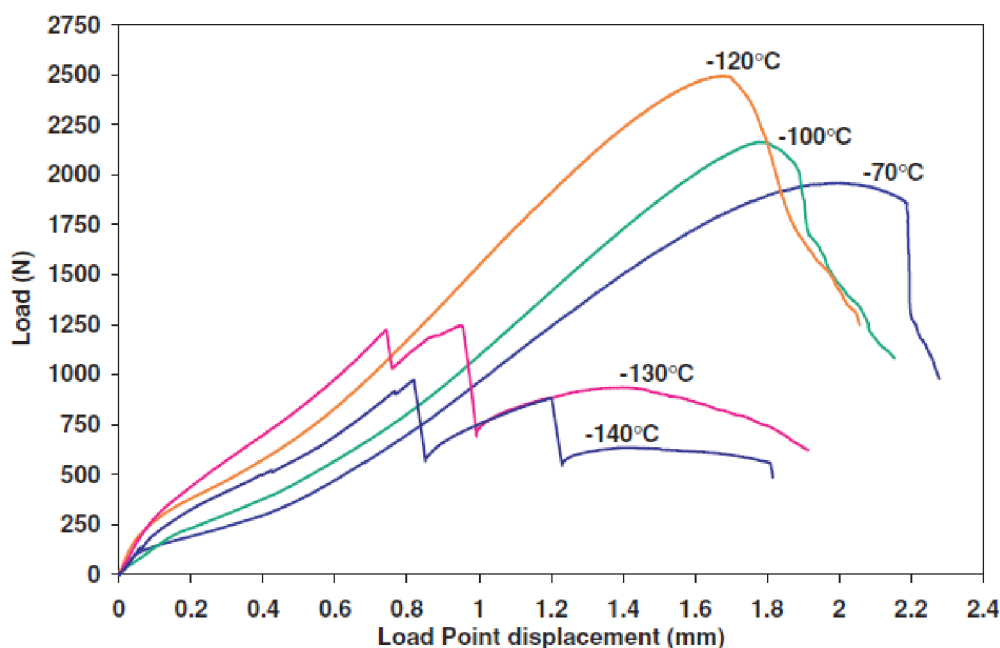
Prepočtové rovnice pre stanovenie $FATT$ ocelí z literatúry

$$FATT = 2,3661 \cdot T_{SP} - 10,639, \quad (31)$$

$$FATT = \frac{T_{SP}}{0,56}. \quad (32)$$

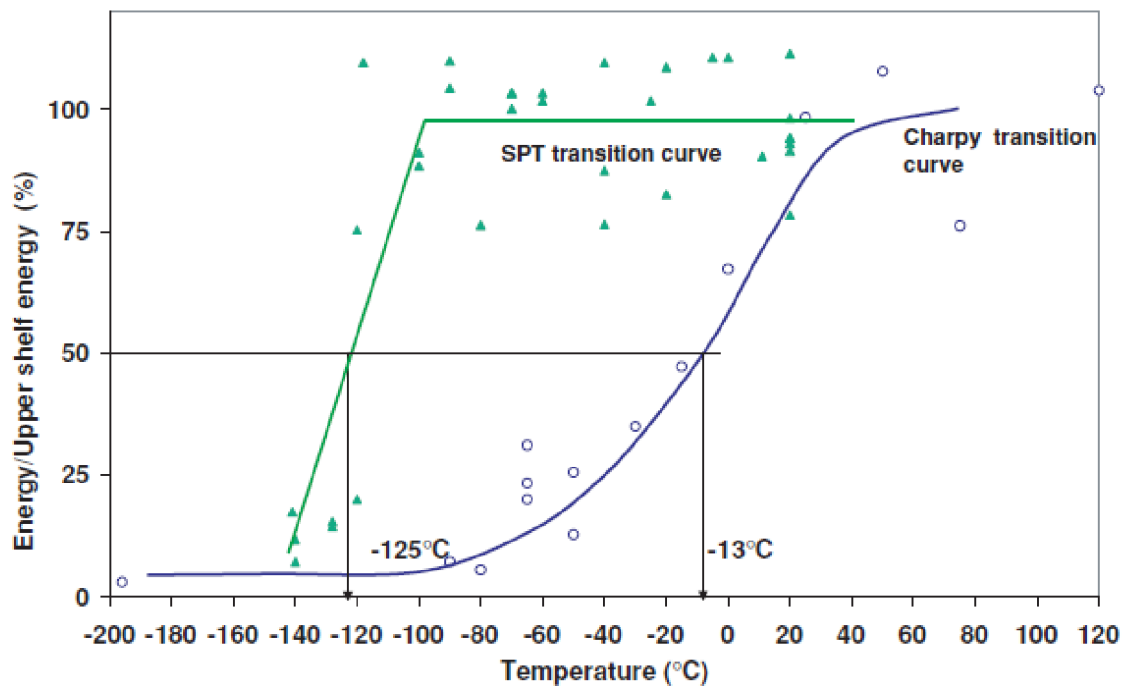
V rov. (31) a (32) je T_{SP} tranzitná teplota z výsledkov penetračných skúšok, $FATT$ je tranzitná teplota zo skúšky rázom v ohybe, obe teploty $FATT$ aj T_{SP} sú v [K]. Rov. (33) bola odvodená pre uhlíkové a nízkolegované ocele [1], rov. (34) je uvedená v práci [15].

V práci [15] boli taktiež vykonané série penetračných skúšok na oceli AE460 v intervale teplôt (-140 až 20) °C s cieľom stanoviť tranzitnú teplotu a teplotné závislosti mechanických charakteristík, vid' obr. 30.



Obr. 30 Závislosti zataženie – posunutie získané vykonaním penetračných skúšok na oceli AE460 v teplotnom rozsahu (-140 až $+20$)°C [15]

S klesajúcimi teplotami narastá maximálna zaznamenaná sila F_m a klesá hodnota posunutia razníka pri tejto sile u_m až do teplôt, pri ktorých sa prejaví skrehnutie materiálu náhlým porušením skúšobnej vzorky. Náhle porušenie vzorky je zrejme z náhleho poklesu záťažnej sily pri teplotách -130 °C a -140 °C. Ako je zrejme z obr. 31, tranzitné správanie je v prípade penetračných skúšok možné pozorovať pri nižších teplotách v porovnaní so skúškou rázom v ohybe. Tranzitná teplota T_{SP} bola stanovená -125 °C, tranzitná teplota $FATT$ zo skúšky rázom v ohybe -13 °C [15].

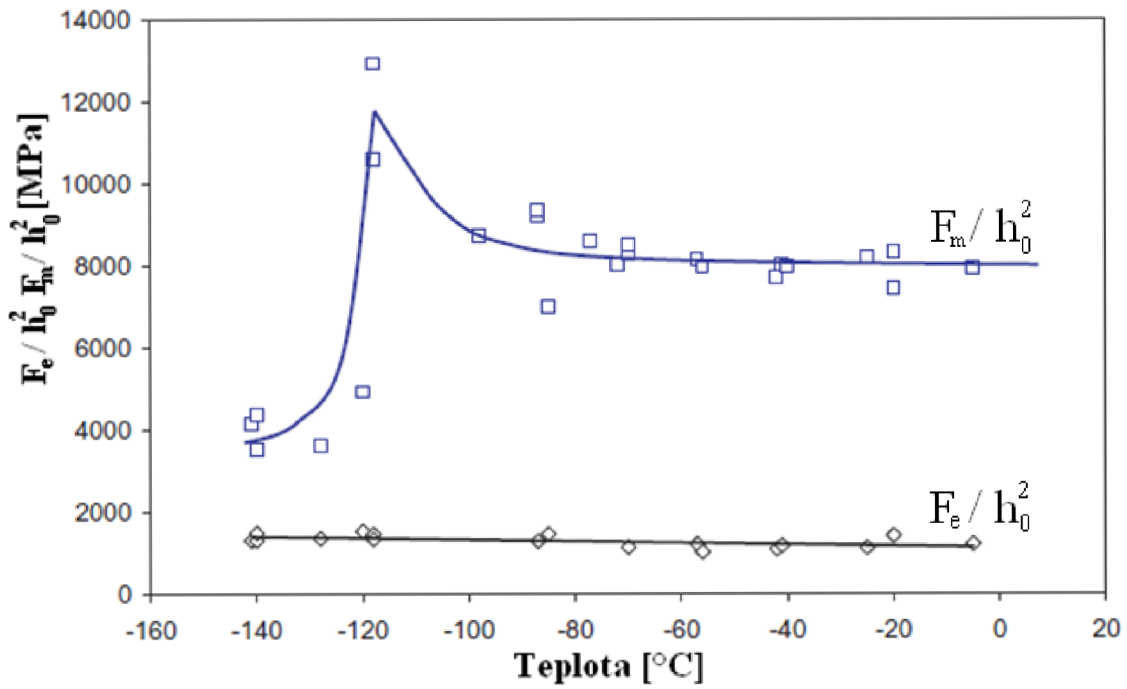


Obr. 31 Tranzitné krivky získané z penetračnej skúšky a zo skúšky rázom v ohybe [15]

Autori práce [15] taktiež zistili, že za účelom stanovenia tranzitnej teploty T_{SP} z výsledkov penetračných skúšok je možné okrem známeho postupu stanovenia teplotnej závislosti lomovej energie E^{SP} použiť aj iný postup. Ako vyplýva z obr. 32, tranzitnú teplotu T_{SP} je taktiež možné stanoviť zo závislosti F_m/h_0^2 na teplote. Získaná teplota $T_{SP} = -125^\circ\text{C}$ je totožná s teplotou získanou použitím bežného postupu s využitím závislosti lomovej energie E^{SP} .

Taktiež bolo zistené [15], že v teplotnom intervale (-60 až $+50$) $^\circ\text{C}$ možno nájsť lineárnu závislosť medze klzu R_e a medze pevnosti R_m na teplote.

Skutočnosť, že tranzitná teplota T_{SP} je vo všeobecnosti podstatne nižšia v porovnaní s tranzitnou teplotou získanou zo skúšky rázom v ohybe a priori vysvetľujú rozdielnym charakterom skúšok. Penetračná skúška je skúška statická s dvojším stavom napätosti v momente porušenia vzorky, na rozdiel od skúšky rázom v ohybe, ktorá sa vyznačuje dynamickým charakterom a trojsím stavom napätosti v momente porušenia skúšobného telesa. Táto skutočnosť pravdepodobne súvisí tiež s faktom, že skúšobné vzorky pre skúšku rázom v ohybe sú opatrené V-vrubom [15].



Obr. 32 Teplotná závislosť charakteristických síl F_e a F_m normalizovaných počiatkovou hrúbkou h_0 , upravené podľa [15]

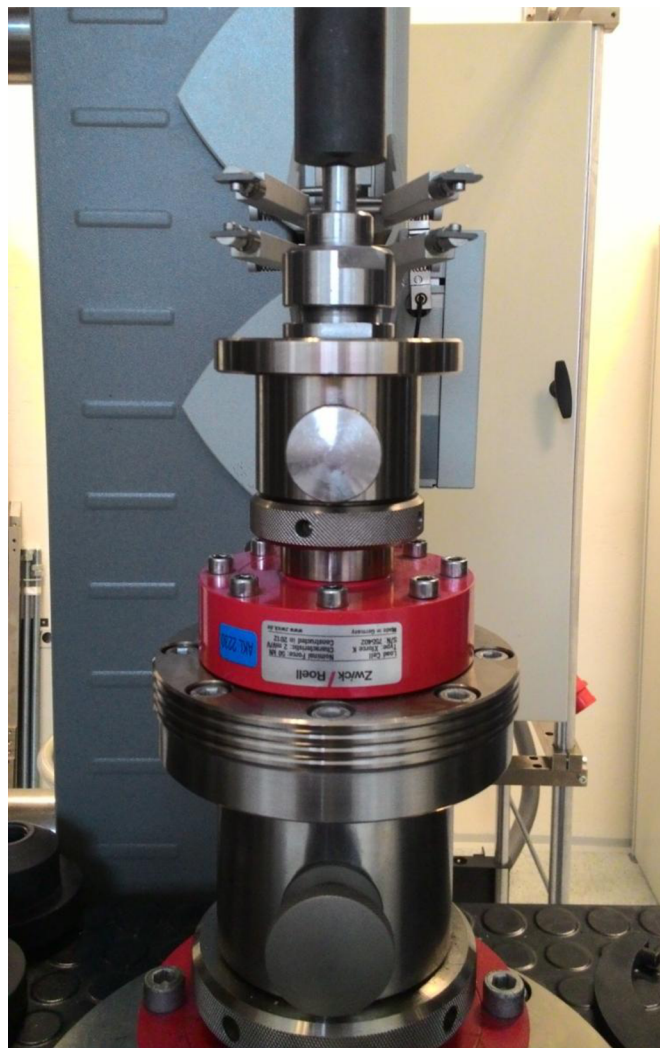
II. EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Ciele experimentálnej časti diplomovej práce zahŕňajú:

- konštrukčný návrh skúšobného prípravku k realizácii penetračných skúšok v teplotnom intervale (-80 až $+25$) °C,
- manuálnu laboratórnu prípravu skúšobných vzoriek s priemerom 8 mm a hrúbkou 0,5 mm s dodržaním prísnych tolerancií hrúbky vzoriek,
- vykonanie penetračných skúšok v intervale teplôt (-80 až $+25$) °C,
- vyhodnotenie teplotných závislostí základných mechanických charakteristík (medze klzu R_e , medze pevnosti R_m , ťažnosti A) získaných prepočtom z výsledkov penetračných skúšok a stanovenie tranzitnej teploty *FATT* taktiež z výsledkov penetračných skúšok,
- vyhodnotenie teplotných závislostí základných mechanických charakteristík (medze klzu R_e , medze pevnosti R_m , ťažnosti A) a stanovenie tranzitnej teploty *FATT* prostredníctvom štandardných skúšok mechanických vlastností (skúška ťahom a skúška rázom v ohybe),
- analýzu porušených skúšobných vzoriek,
- porovnanie teplotných závislostí mechanických charakteristík stanovených prostredníctvom penetračných skúšok s teplotnými závislosťami charakteristík stanovených prostredníctvom štandardných skúšok mechanických vlastností.

4 NÁVRH SKÚŠOBNÉHO PRÍPRAVKU A PRÍPRAVA VZORIEK

V rámci diplomovej práce bol navrhnutý skúšobný prípravok pre realizáciu penetračných skúšok. Pri návrhu bolo potrebné zohľadniť možnosť dobrej integrácie do systému univerzálneho skúšobného stroja Zwick Z250 Allround-Line, tCII, ktorým je vybavená mechanická skušobňa Ústavu materiálových vied a inžinýrství (ÚMVI), obr. 33.



Obr. 33 Univerzálny skúšobný stroj Zwick Z250 v konfigurácii s navrhnutým skúšobným prípravkom pre penetračné skúšky

Taktiež bolo potrebné zohľadniť možnosť realizácie penetračných skúšok v pomerne širokom teplotnom rozsahu. V prípade predkladanej diplomovej práce sa jedná o teplotný interval (-80 až $+25$) °C. Túto skutočnosť bolo potrebné zohľadniť ako pri samotnom konštrukčom riešení prípravku, tak aj pri voľbe vhodných materiálov pre jeho výrobu.

Integrácia skúšobného prípravku do systému skúšobného stroja bola realizovaná použitím upínacieho prípravku skúšobného stroja (obr. 34) s vnútorným závitom, do ktorého bol navrhnutý odpovedajúci vonkajší závit prípravku pre penetračné skúšky.



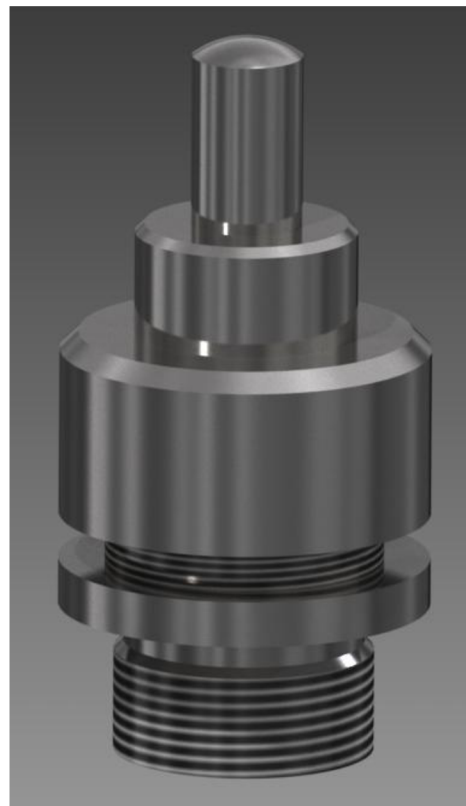
Obr. 34 Upínací prípravok skúšobného stroja

4.1 Popis častí prípravku, usporiadania skúšky a použitých snímačov

V procese konštrukcie skúšobného prípravku boli navrhnuté viaceré konštrukčné varianty, napr. obr. 35, z ktorých bol následne vybraný výsledný návrh, obr. 36.



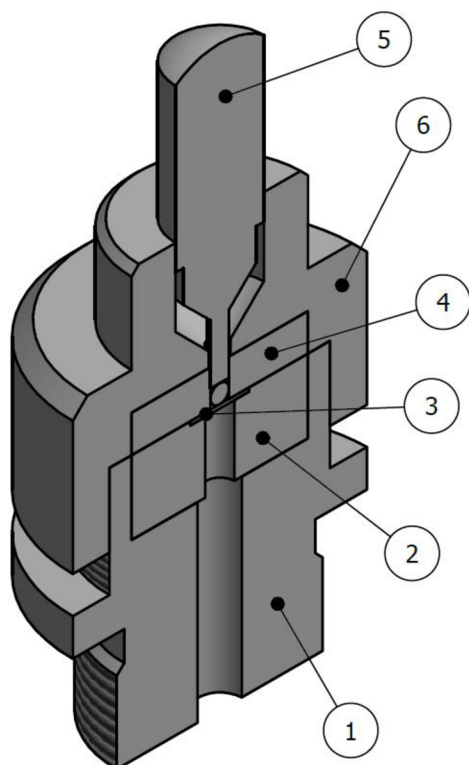
Obr. 35 Jedno z možných konštrukčných riešení skúšobného prípravku



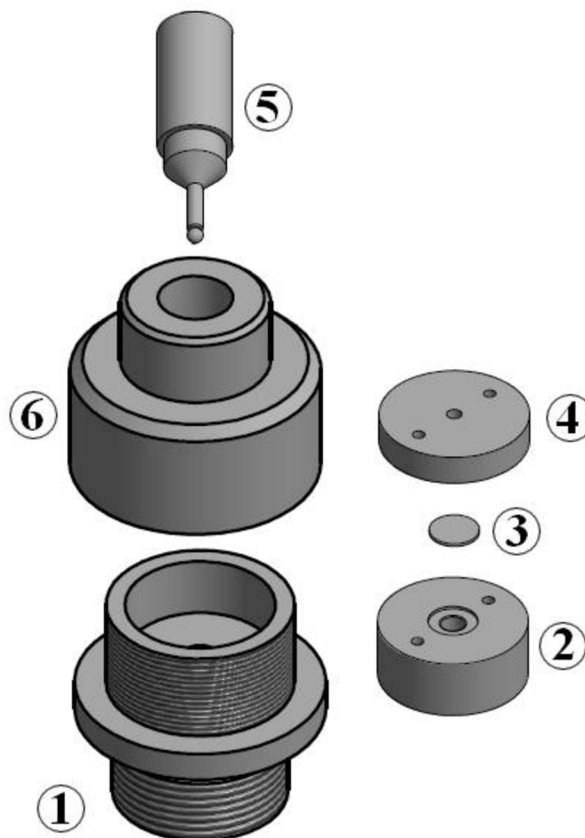
Obr. 36 Konečné konštrukčné riešenie skúšobného prípravku

V prípade návrhu na obr. 35 bolo uvažované použitie sponového snímača (*clip gage*) medzi rámy spodnej a hornej matrice. Do úvahy taktiež pripadala náhrada hornej matrice tlačnou doskou a využitie rovnakého typu snímača.

V prípade realizovaného návrhu z obr. 36 až 38, je meranie posuvu razníka realizované využitím ramienkového snímača MultiXtens. Prípravok je integrovaný do systému univerzálneho skúšobného stroja prostredníctvom upínacieho prípravku z obr. 34 našraubovaním. Rez skúšobného prípravku s popisom jeho častí zachytáva obr. 37. Kompozícia skúšobného prípravku z jednotlivých dielov je zrejmá z obr. 38.



Obr. 37 Rez realizovaného skúšobného prípravku pre penetračné skúšky



Obr. 38 Usporiadanie jednotlivých častí skúšobného prípravku

Tabuľka 5 Popis jednotlivých súčiastok zostavy skúšobného prípravku

Pozícia	Súčiastka	Materiál
1	spodná matrica	X46Cr13
2	spodná vložka	nástrojová oceľ
3	skúšobná vzorka	S235 JRC - SA
4	horná vložka	nástrojová oceľ
5	razník s guľôčkou	nástrojová oceľ (razník) + Al ₂ O ₃ (guľôčka)
6	horná matrica	X46Cr13

pozn. SA – soft annealing (žihanie na mätko 650°C / 1 hod.)

Z obr. 37, 38 a z tabuľky 5 je zrejmé, že pri získavaní experimentálnych dát pre účely predkladanej diplomovej práce bola využitá guľôčková penetračná skúška v usporiadaní *bulge punch test*, kedy je v celom priebehu skúšky vzorka pevne upnutá medzi spodnou a hornou matricou skúšobného prípravku. Použitá guľôčka má priemer 2,5 mm a je vyhotovená z Al_2O_3 .

Zaťažovanie razníka prebiehalo v konfigurácii konštantnej rýchlosti posuvu (CDR - *constant deflection rate*).

4.2 Popis experimentálneho materiálu

Na výrobu skúšobných vzoriek s priemerom 8 mm a hrúbkou 0,5 mm bol použitý tyčový polotovár priemeru 8 mm z ocele S235 JRC – SA (ocel' 11 375 podľa ČSN 41 1375). Daný polotovár bol žiháný na mätko pri teplote $650^{\circ}C$ po dobu 1 hodiny s cieľom získať materiál vykazujúci tranzitné správanie pri pomerne ľahko dosiahnuteľných záporných teplotách pri použití konvenčných skúšok.

Využitím spektrálnej analýzy na zariadení *Spectrumat GDS 750* bolo stanovené chemické zloženie použitého experimentálneho materiálu (oceli S235 JRC – SA), vid' tab. 6. Chemické zloženie ocele S235 JRC podľa materiálového listu je uvedené v tab. 7.

Tabuľka 6 Chemické zloženie ocele S235 JRC – SA (hm. %)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Sn
0,09	0,41	0,22	0,009	0,003	0,15	0,22	0,05	0,40	0,008	0,02

Tabuľka 7 Chemické zloženie ocele S235 JRC podľa materiálového listu (hm. %)

C	Mn	P	S	N
max 0,17	max 1,4	max 0,045	max 0,045	max 0,009

Podľa materiálového listu je ocel' vhodná na súčiastky konštrukcií a strojov menších hrúbok, tavné zvarané, staticky alebo mierne dynamicky namáhané konštrukcie, pracujúce za znížených teplôt do $-20^{\circ}C$. Mechanické vlastnosti podľa materiálového listu sú uvedené v tab. 8. Jedná sa o konštrukčnú, dobre zvariteľnú feriticko-perlitickú ocel'.

Tabuľka 8 Mechanické vlastnosti ocele S235 JRC uvedené v materiálom liste

stav	R_{eH} min [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%] min pozdĺžny smer	A_5 [%] min pričný smer	KV^{-20} [J]	tvrdosť HB
normalizačne žiháný	235	340-470	26	24	-	-

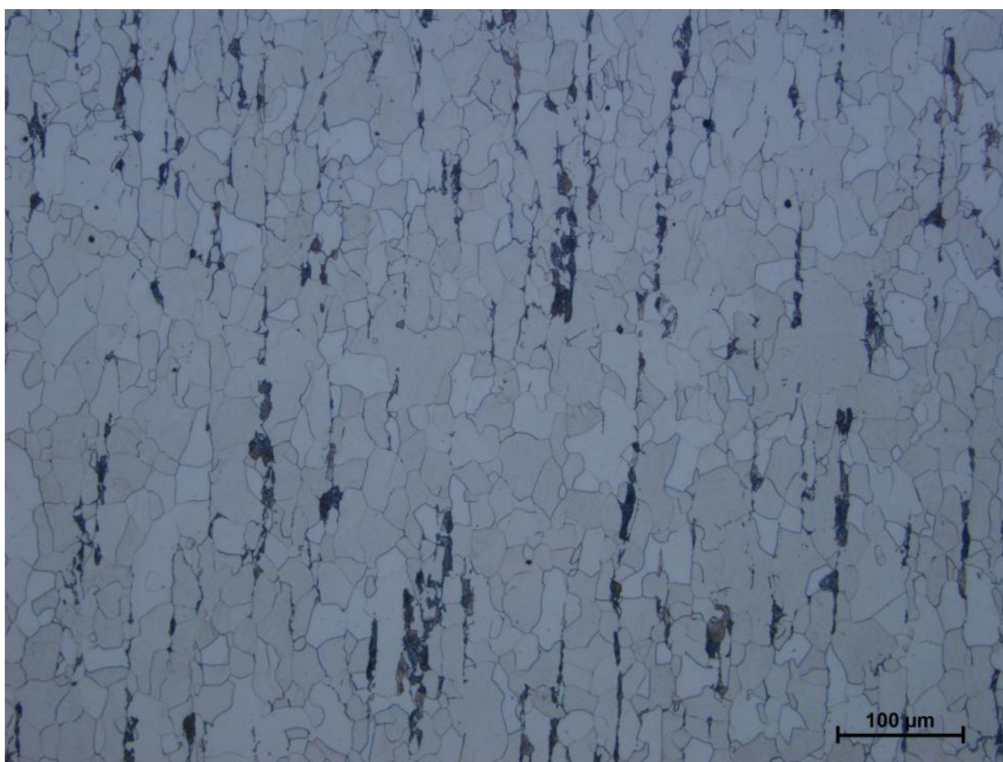
Nakoľko polotovár pre prípravu vzoriek bol materiál spracovaný technológiou valcovania, je potrebné rozlišovať jeho pozdĺžny (L) a pričný (T) smer. V prípade valcovaného materiálu je pozdĺžny smer (L) charakteristický riadkovitosťou štruktúry, čo súvisí so samotnou technológiou valcovania, vid' obr. 39.

Tvrdosť bola stanovená tvrdometrom *Leco LV700* pre pozdĺžny aj priečny smer rezu

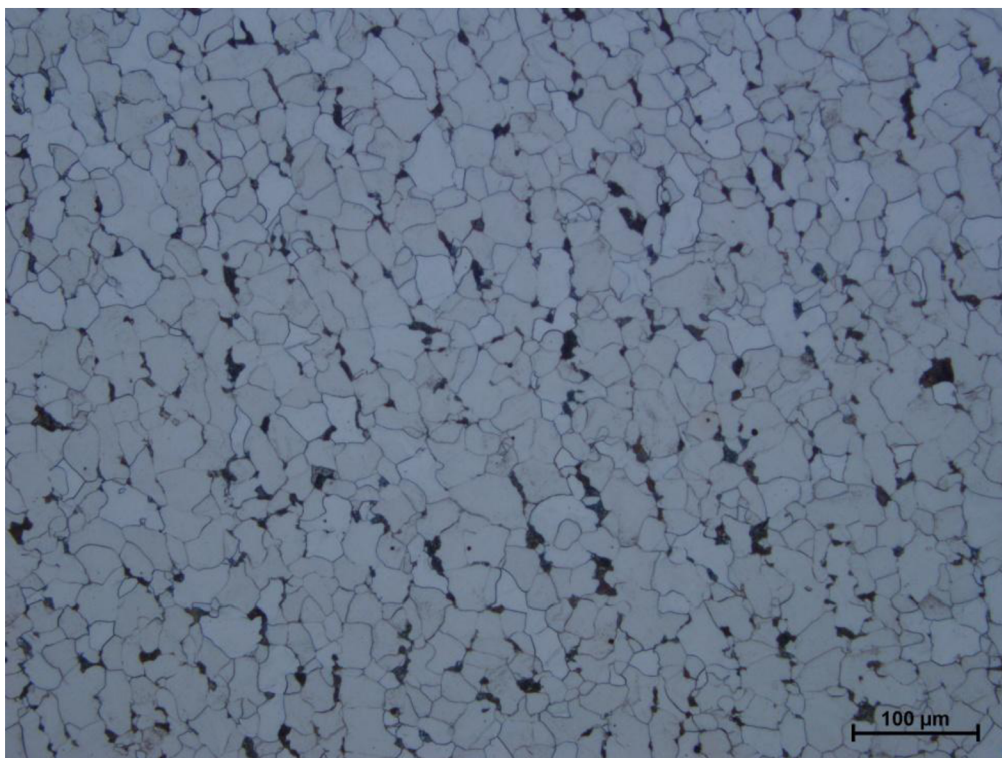
- **priečny smer T:** 151,1 HV10,
- **pozdĺžny smer L:** 151,5 HV10.

Získaná hodnota tvrdosti HV10 je pre oba smery v podstate zhodná.

Využitím metalografickej metódy boli pripravené vzorky pre vyhodnotenie štruktúry použitého experimentálneho materiálu. Bol použitý štandardný postup prípravy metalografických vzoriek ocelí, pričom boli vzorky brúsené a leštené. Za účelom zviditeľnenia hraníc zŕn boli vzorky leptané leptadlom Nital, čo je 3% roztok kyseliny dusičnej v ethanole. Zviditeľnenie hraníc zŕn bolo vykonané s cieľom následného vyhodnotenia strednej veľkosti zrna.



Obr. 39 Štruktúra ocele S235 JRC – SA, pozdĺžny smer L, Nital, zväčšenie 200×



Obr. 40 Štruktúra ocele S235 JRC – SA, priečny smer T, Nital, zväčšenie 200×

Podľa normy ČSN EN ISO 643 bola lineárnou priesečníkovou metódou vyhodnotená stredná veľkosť zrna. Ako je uvedené v norme, v prípade tvárnených výrobkov a polotovarov je potrebné hodnotenie veľkosti zrna realizovať z pozdĺžnej (L) leštenej plochy vzorky. Uvedenou metódou bola určená stredná veľkosť zrna $D = 23,05 \mu\text{m}$.

4.3 Príprava vzoriek pre penetračné skúšky

Na výrobu skúšobných vzoriek bol použitý tyčový polotovar priemeru 8 mm. Tyč bola elektroiskrovo narezaná na disky s hrúbkou cca 0,63 mm. Ako bolo uvedené v teoretickej časti diplomovej práce (napr. v kap. 1.3), požaduje sa dosiahnutie vysokej presnosti hrúbky a rovnobežnosti povrchov vzoriek. Navyše je požadovaná vysoká kvalita povrchov vzoriek, leštené povrchy.

Za účelom získania experimentálnych dát pre potreby predkladanej diplomovej práce bolo manuálne pripravených vyše 60 kusov vzoriek pre penetračné skúšky. Príprava vzoriek prebiehala v metalografickom laboratóriu na Ústave materiálových vied a inžinýrství na Fakulte strojnínho inžinýrství VUT v Brne. Pripravené boli taktiež skúšobné telesá pre skúšku ťahom a skúšku rázom v ohybe.



Obr. 41 Metalografická brúska
Struers Pedemin-2



Obr. 42 Presná diamantová rezačka *Leco VC-50*

Za použitia metalografickej brúsky *Struers Pedemin-2* (obr. 41) boli vzorky zbrúsené na hrúbku asi 0,55 mm. Za týmto účelom bol použitý nastaviteľný ručný prípravok, na ktorý boli vzorky prichytené adhéziou vody. Následne bolo za použitia diamantovej pasty so zrnitosťou 3 μm vykonané leštenie oboch povrchov vzoriek s cieľom získať leštené povrchy a dosiahnuť konečnej hrúbky vzoriek $h_0 = 0,500 \pm 0,005$ mm. Aj v tejto fáze bol použitý spomínaný prípravok. Neustále v priebehu procesu brúsenia a leštenia bolo potrebné kontrolovať aktuálnu hrúbku vzoriek použitím digitálneho mikrometra. Prípravok bol kalibrovaný analógovým odchýlkomerom so stojanom.

Metalografická metóda bola použitá taktiež pri príprave vzoriek pre pozorovanie porušených skúšobných SPT vzoriek s cieľom porovnania tvarov tzv. „klobúčikov“ s ohľadom na teplotu skúšania. Boli vybrané vzorky porušené pri teplotách (25, -20, -60, -80) °C.

Skúšobné vzorky boli najskôr zalisované za studena, aby nedošlo k tepelnému a mechanickému ovplyvneniu porušených skúšobných vzoriek. Použité boli prípravky *Clarocit Powder* a *Clarocit Liquid* v pomere 10:6. Pre zalievanie bolo potrebné dodržať uvedený pomer oboch prípravkov. Na zalíatie jednej vzorky bolo použitých 6 g *Clarocit Powder* a 3,6 g *Clarocit Liquid*. K naváženiu bola použitá digitálna laboratórna váha. Zalievanie prebehlo pri laboratórnej teplote a čas zatvrdnutia hmoty bol približne 6 hodín. Po zatvrdnutí hmoty boli porušené SPT vzorky rezané kolmo vzhľadom na trhlinu spolu so zalievacou hmotou na presnej diamantovej rezačke *Leco VC-50* (obr. 42). Vzniknuté rezy boli brúsené na metalografickej brúske (obr. 41) použitím jemného brúsneho papiera so zrnitosťou 1200. Vzorky boli následne dokumentované použitím stereolupy a SEM (viď Príloha B).

5 VÝSLEDKY A DISKUSIA

V rámci experimentálnej časti práce boli vykonané série penetračných skúšok pri teplotách (+25, 0, -20, -40, -60, -80) °C na oceli S235 JRC – SA. Pri rovnakých teplotách boli realizované štandardné skúšky ťahom. Skúšky rázom v ohybe boli vykonané v teplotnom intervale (-50 až +60) °C. Cieľom bolo porovnať teplotné závislosti mechanických charakteristík získaných z penetračných a štandardných skúšok.

5.1 Stanovenie teplotných závislostí štandardných mechanických charakteristík z klasických skúšok

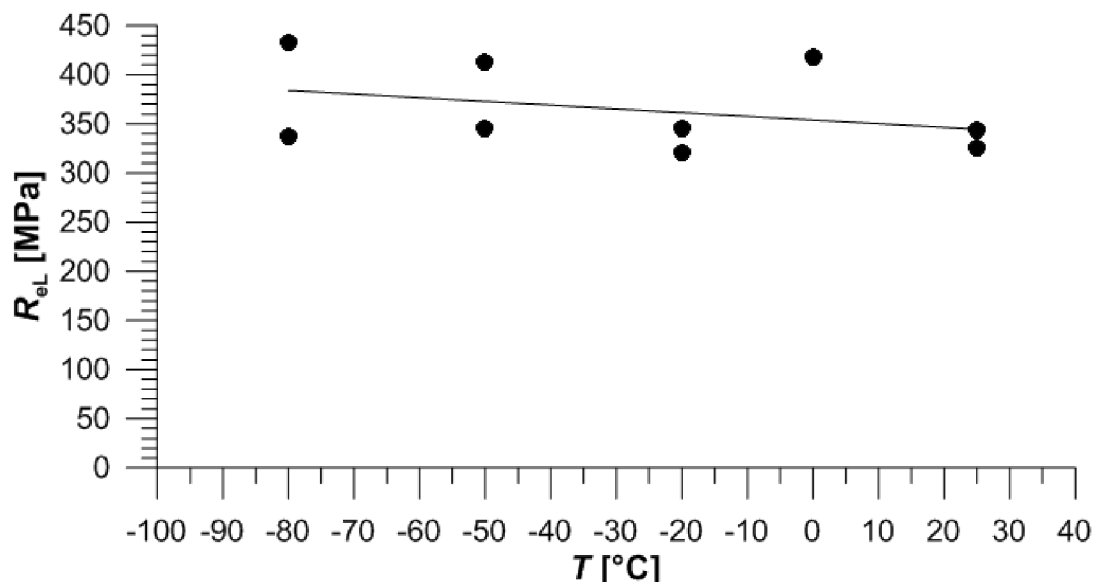
S využitím skúšky ťahom a skúšky rázom v ohybe boli stanovené teplotné závislosti mechanických charakteristík ocele S235 JRC – SA. Výsledky skúšok ťahom pokrývajú rovnaký teplotný interval (-80 až +25) °C ako v prípade penetračných skúšok.

Skúšky rázom v ohybe boli vykonané v teplotnom intervale (-50 až +60) °C.

Pre skúšky ťahom boli použité skúšobné tyče 5×25 mm podľa DIN 50125. Pre skúšku rázom v ohybe boli použité štandardné skúšobné telesá dĺžky 55 mm, štvorcového prierezu (10×10) mm s V-vrubom hĺbky 2 mm podľa normy ČSN ISO 148-1.

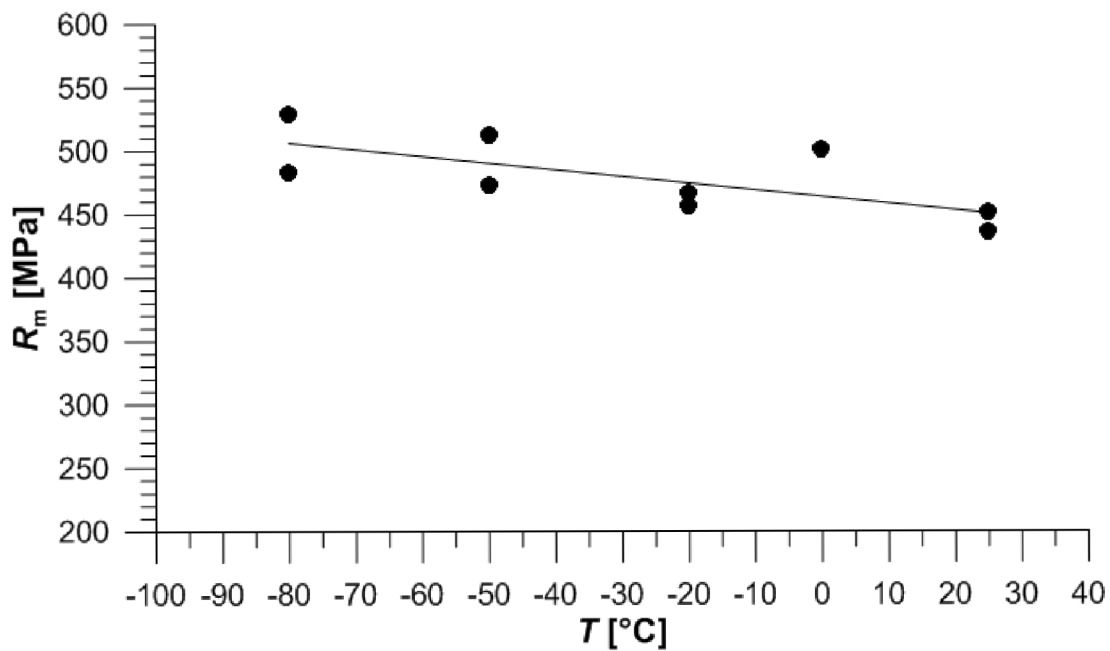
Tabuľkové vstupy pre teplotné závislosti z kapitoly 5.1 sú uvedené v Prílohe E, záznamy skúšok ťahom sú obsahom Prílohy D.

A) Teplotné závislosti charakteristík získaných zo skúšky ťahom



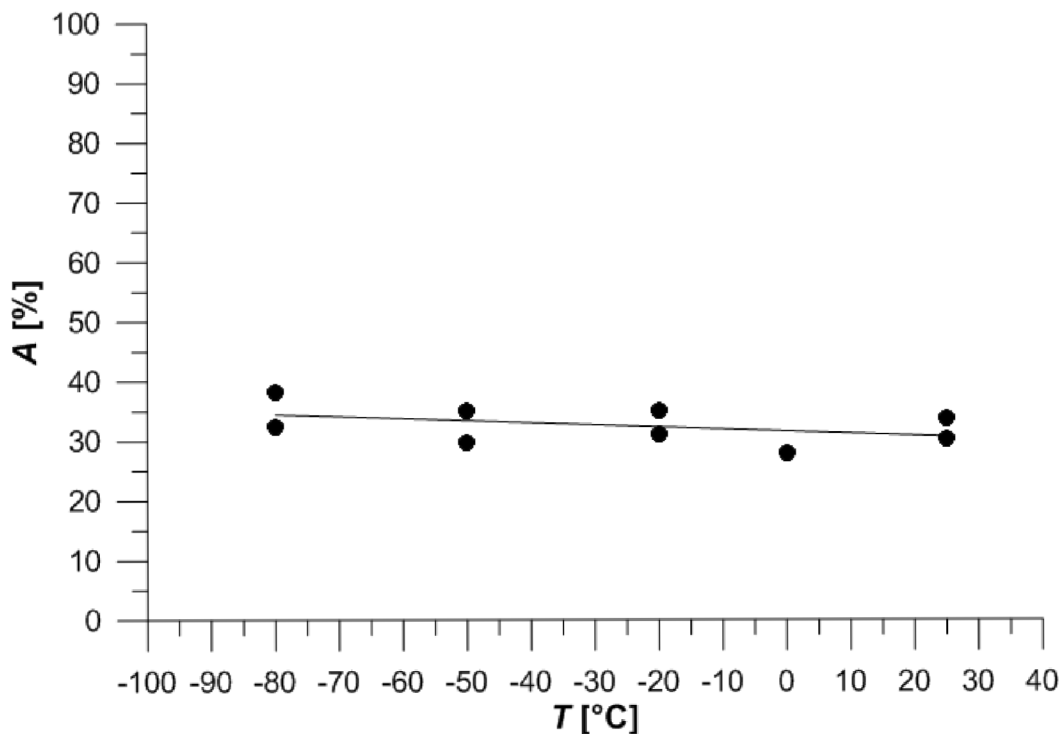
Obr. 43 Teplotná závislosť dolnej medze klzu R_{eL} stanovená zo skúšky ťahom

Ako je zrejmé z obr. 43, získané hodnoty R_{eL} pre jednotlivé teploty vykazujú určitý rozptyl. Možno však konštatovať, že s klesajúcou teplotou narastajú hodnoty dolnej medze klzu R_{eL} , čo je v súlade s očakávaním.

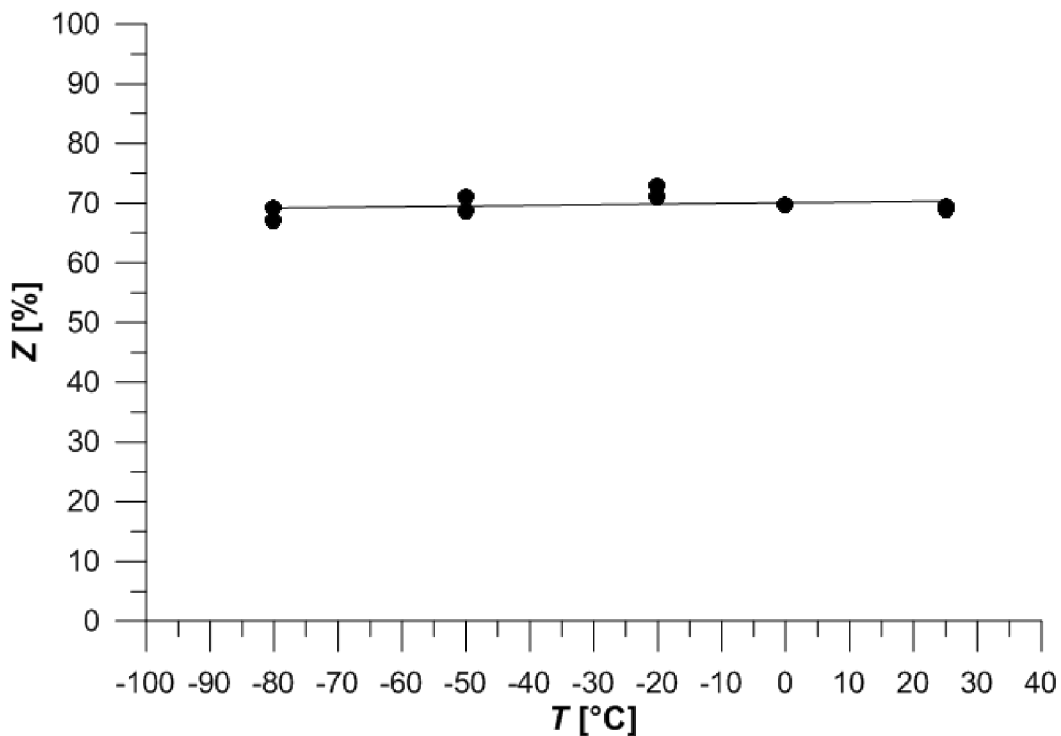


Obr. 44 Teplotná závislosť medze pevnosti R_m stanovená zo skúšky ťahom

V prípade závislosti z obr. 44 možno taktiež pozorovať určitý rozptyl hodnôt pri jednotlivých teplotách. Zo závislosti na obr. 44 možno tiež konštatovať, že s klesajúcou teplotou dochádza k očakávanému nárastu hodnôt medze pevnosti R_m .



Obr. 45 Teplotná závislosť ťažnosti A stanovená zo skúšky ťahom

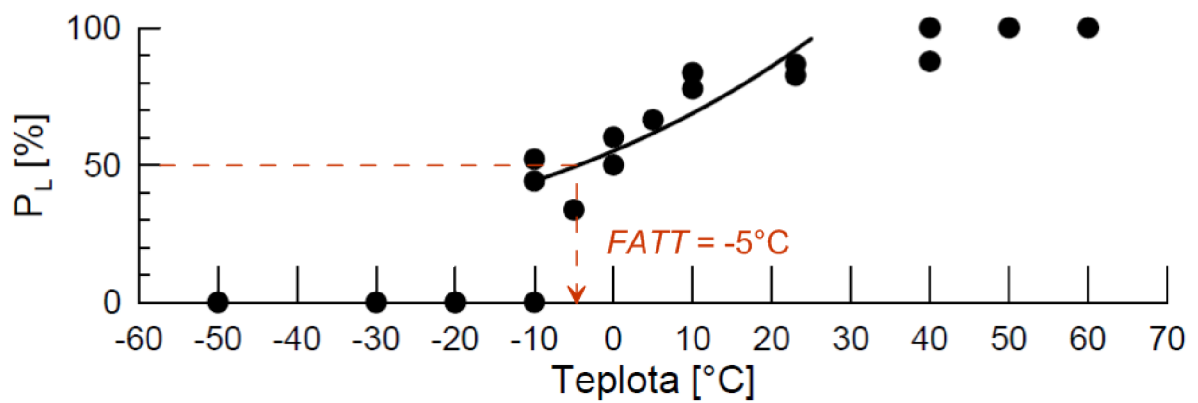
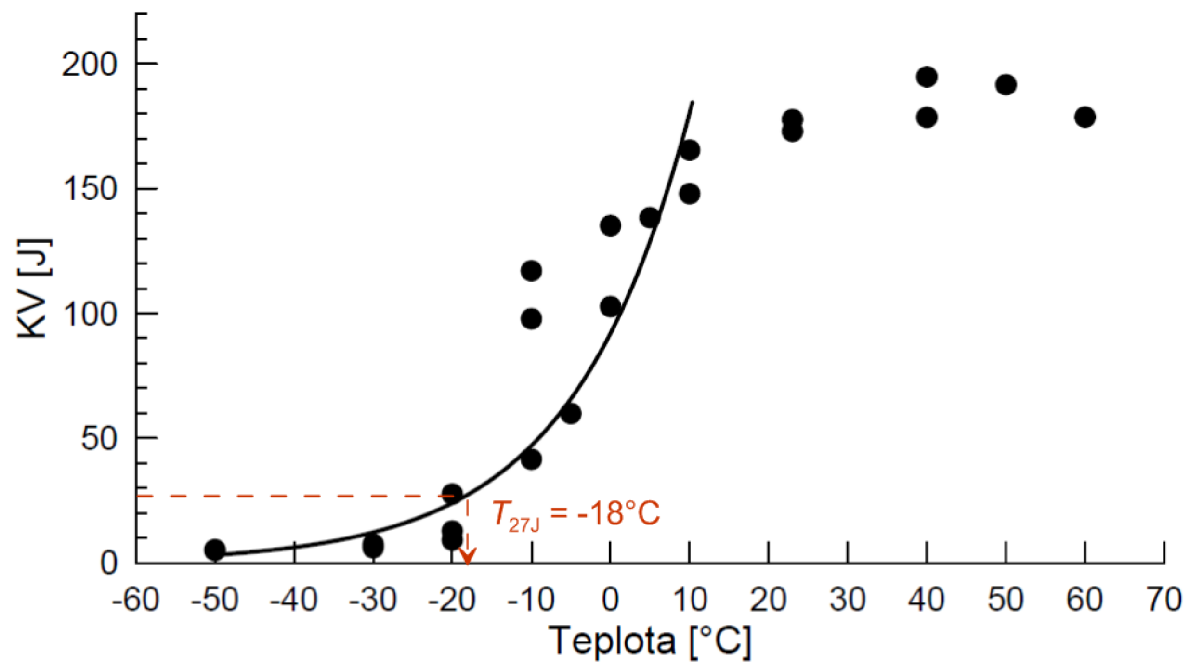


Obr. 46 Teplotná závislosť kontrakcie Z stanovená zo skúšky ťahom

Teplotné závislosti deformačných charakteristík ťažnosti A a kontrakcie Z sú uvedené na obr. 45 a 46. V prípade ťažnosti A dochádza k miernemu nárastu hodnôt s poklesom teploty, hodnoty kontrakcie Z s poklesom teploty mierne klesajú. Zmeny sú ale v danom teplotnom intervale v oboch prípadoch nevýrazné.

B) Stanovenie tranzitnej teploty $FATT$ a T_{27J} zo skúšky rázom v ohybe

Z výsledkov skúšok rázom v ohybe v teplotnom intervale (-50 až $+60$) °C bola stanovená teplotná závislosť nárazovej práce KV a závislosť podielu tvárneho lomu P_L na teplote. Boli stanovené tranzitné teploty $FATT = -5$ °C (odpovedá 50% tvárneho lomu na lomovej ploche) a tranzitná teplota $T_{27J} = -18$ °C (teplota odpovedajúca nárazovej práci 27J). Tranzitné krivky sú uvedené na obr. 47.



Obr. 47 Stanovenie tranzitných teplôt T_{27J} a $FATT$ z výsledkov skúšky rázom v ohybe

5.2 Stanovenie teplotných závislostí štandardných mechanických charakteristík z penetračných skúšok

Za účelom stanovenia teplotných závislostí štandardných mechanických charakteristík z výsledkov penetračných skúšok boli použité prepočtové rovnice uvedené v teoretickej časti diplomovej práce v kapitole 3. Charakteristické sily a veličiny stanovené zo záznamov penetračných skúšok (viď Príloha A) sú uvedené v tab. 9.

Tabuľka 9 Charakteristické sily a veličiny stanovené zo záznamov penetračných skúšok

č. vz.	T [°C]	h_0 [mm]	F_m [N]	u_m [mm]	F_{e_Mao} [N]	F_{e_CEN} [N]	$F_{e_v/10}$ [N]	$F_{e_v/100}$ [N]	F_{e_INF} [N]
1	25 °C	0,499	1287	1,72	215	152,5	239,5	125	58,8
2	25 °C	0,498	1289	1,71	180,2	106,6	190,6	78,9	43
3	25 °C	0,497	1281,1	1,72	184,6	146	238,6	126,6	55,3
4	0 °C	0,496	1334,2	1,72	193,2	139,7	220,7	109,7	47,7
5	0 °C	0,495	1330,3	1,78	170,3	155,8	237,3	172,6	35,8
6	-20 °C	0,497	1406,7	1,71	213,2	159,4	251,4	129,8	39,9
7	-20 °C	0,495	1393,9	1,77	165,9	119,9	206,4	100,4	39,9
8	-40 °C	0,501	1473,8	1,76	205,8	151,8	243,3	140,8	39,8
9	-40 °C	0,498	1453,7	1,715	219,9	169,8	261,8	146,7	36,2
10	-60 °C	0,499	1538,2	1,745	234,2	166,1	256,7	116,7	66,7
11	-60 °C	0,498	1569,9	1,747	228,4	183,9	277,9	174,8	68,9
12	-80 °C	0,499	1527,9	1,75	217	159,1	246	130,9	66,8

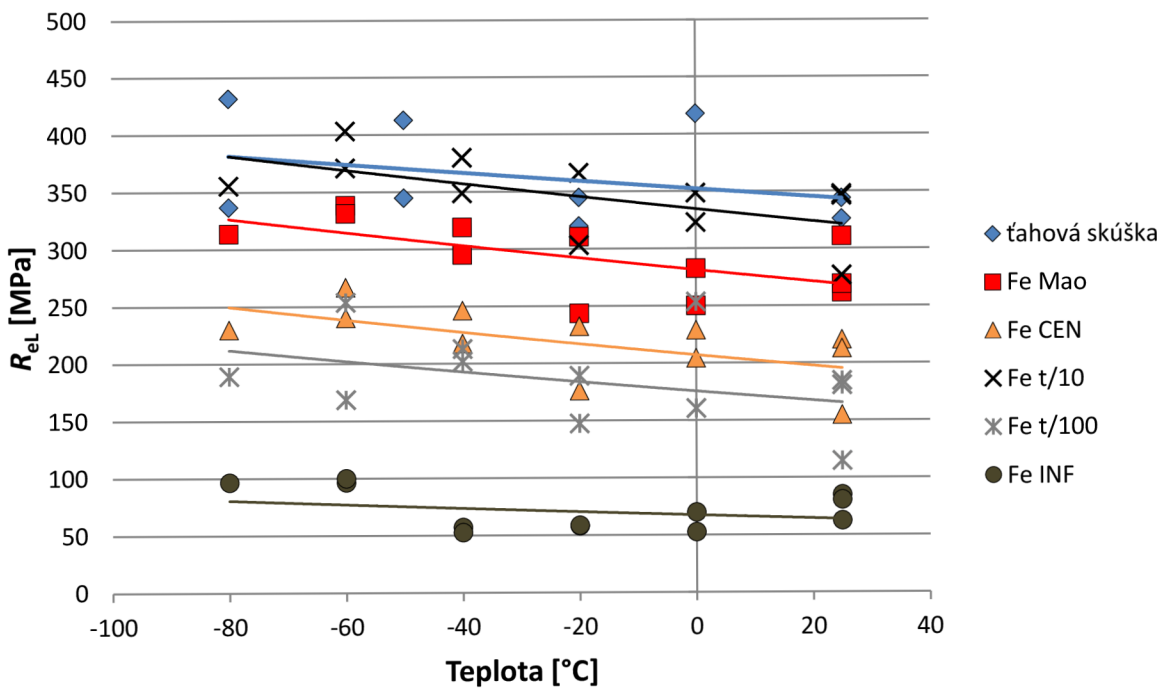
Experimentálne body obsahujúce informáciu o teplotných závislostiach mechanických charakteristík získaných zo skúšky ťahom a z penetračných skúšok sú preložené v grafoch v nasledujúcich podkapitolách krivkami exponenciálneho tvaru $Y = A \cdot e^{B \cdot T}$. Veličina Y predstavuje strednú hodnotu mechanickej charakteristiky (R_e , R_m , A) v závislosti na teplote T . Koeficienty A a B sú regresné parametre.

Tabuľkové vstupy pre teplotné závislosti z kapitoly 5.2 sú uvedené v Prílohe E.

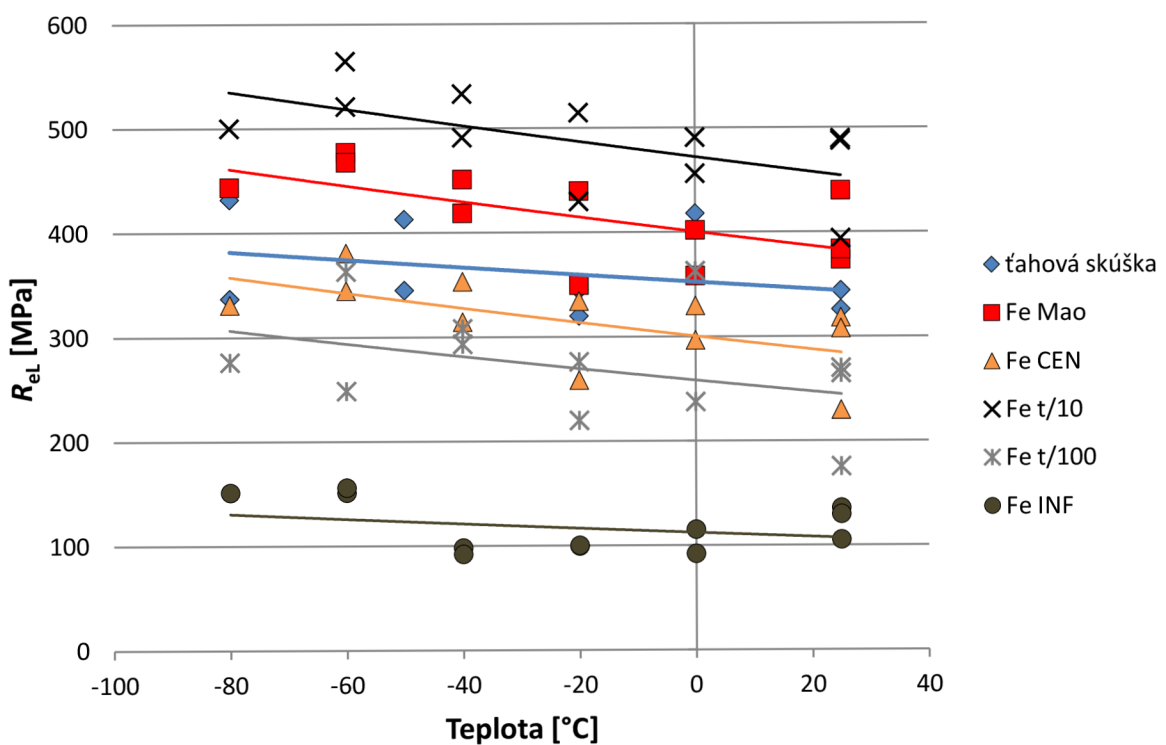
5.2.1 Stanovenie teplotnej závislosti medze klzu R_{eL}

Za účelom prepočtu charakteristických veličín z penetračných skúšok na hodnoty dolnej medze klzu R_{eL} boli použité prepočtové rovnice uvedené v teoretickej časti diplomovej práce.

V prípade použitia rov. (4) a (5) (viď kap. 3.1) bol analyzovaný vplyv spôsobu stanovenia sily F_e na mieru zhody výsledkov prepočítaných z penetračných skúšok a výsledkov skúšky ťahom. Uvedená skutočnosť bola skúmaná z dôvodu, že spôsob stanovenia sily F_e používaný autormi rov. (4) a (5) nebol z literatúry zistený. Ukazuje sa, že v prípade použitia rov. (4) je najlepšej zhody prepočtu s ťahovou skúškou dosiahnuté voľbou spôsobu stanovenia $F_{e_v/10}$. V prípade rov. (5) je najlepšej zhody dosiahnuté voľbou spôsobu stanovenia F_{e_CEN} . Uvedené skutočnosti sú zrejmé z grafov na obr. 48 a 49.

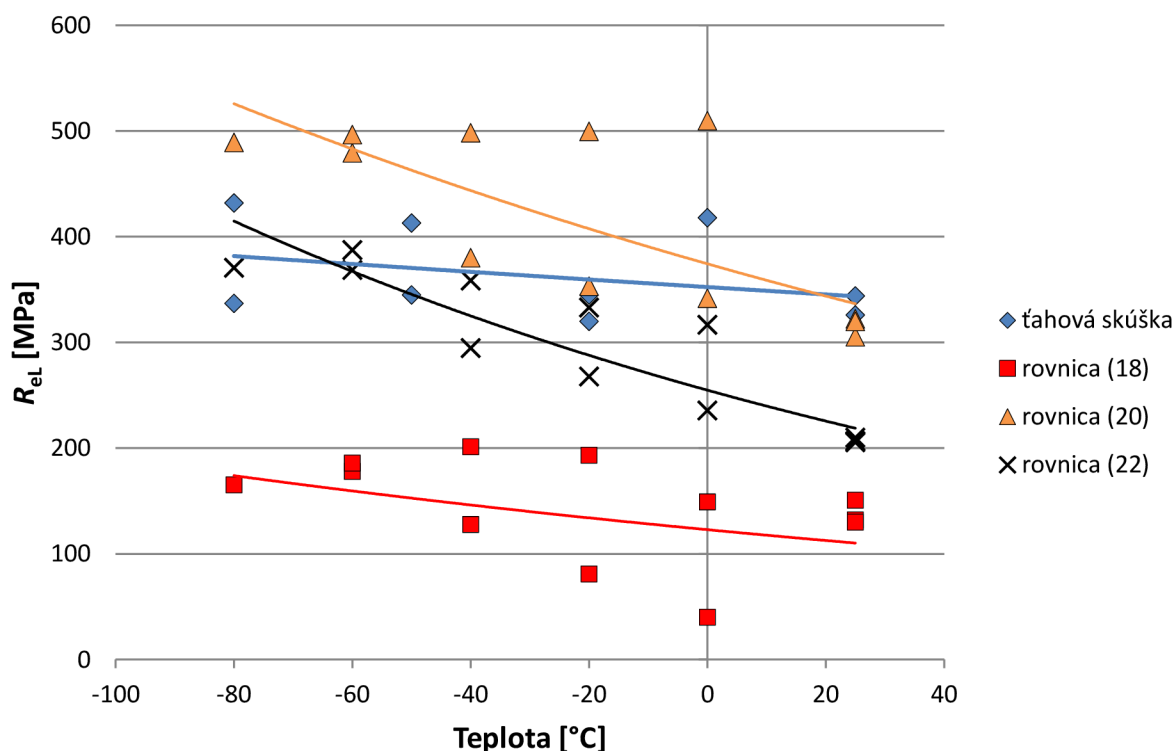


Obr. 48 Vplyv spôsobu stanovenia sily F_c na mieru zhody výsledkov penetračných skúšok s výsledkami skúšok ťahom pri použití prepočtovej rov. (4)



Obr. 49 Vplyv spôsobu stanovenia sily F_c na mieru zhody výsledkov penetračných skúšok s výsledkami skúšok ťahom pri použití prepočtovej rov. (5)

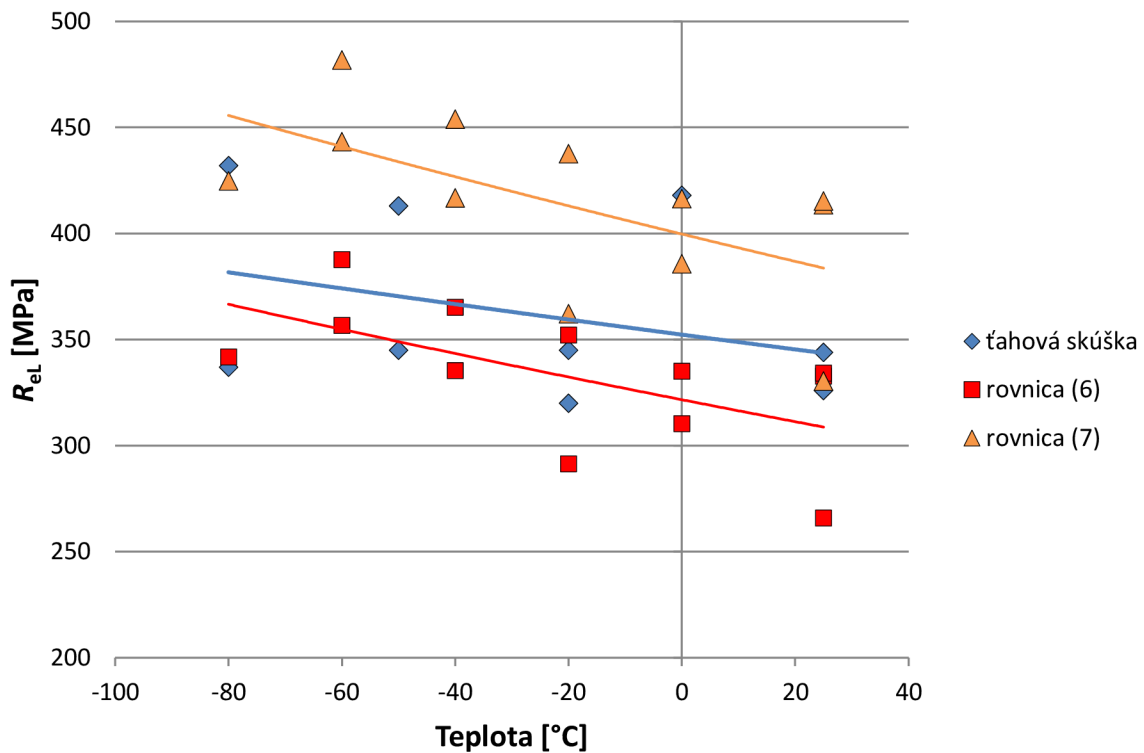
Za účelom prepočtu bol aplikovaný inovatívny prístup a vzťahy stanovené z viacrozmernej lineárnej regresie, vzťahy (18), (20) a (22) podľa kap. 3.3. Z obr. 50 je zrejmé, že použitím žiadnej z uvedených rovníc nie je možné dosiahnuť významnej zhody prepočtu výsledkov penetračných skúšok s výsledkami skúšky ťahom v celom skúmanom teplotnom intervale. Možno však konštatovať, že výsledky prepočtu použitím rov. (20) sú v pomerne dobrej zhode s výsledkom skúšky ťahom pri teplote 25 °C. Dôležité je pripomenúť, že vstupnými parametrami do rov. (18), (20) a (22) sú len posunutie razníka pri maximálnej sile penetračnej skúšky u_m a maximálne zaťaženie zaznamenané v priebehu penetračnej skúšky F_m na rozdiel od konvenčných prepočtových rovníc na medzu klzu R_e , ktoré vyžadujú stanovenie sily F_e zo záznamov penetračných skúšok.



Obr. 50 Porovnanie výsledkov prepočtu R_{eL} použitím rov. (18), (20) a (22) z viacrozmernej lineárnej regresie so skúškou ťahom

V literatúre [11, 15] nájdené rov. (6) a (7), ktoré boli odvodené pre ocele (viď kap. 3.1), boli taktiež použité za účelom prepočtu teplotnej závislosti medze klzu R_{eL} . Pri odvodzovaní rov. (6) a (7) autormi bola sila na medzi klzu penetračnej skúšky vyhodnocovaná postupom $F_{e,1/10}$. Autori prác [11, 15, 20] uvádzajú, že použitím uvedeného postupu stanovenia sily F_e je možné dosiahnuť najlepšej zhody prepočtov pre širší rozsah materiálov.

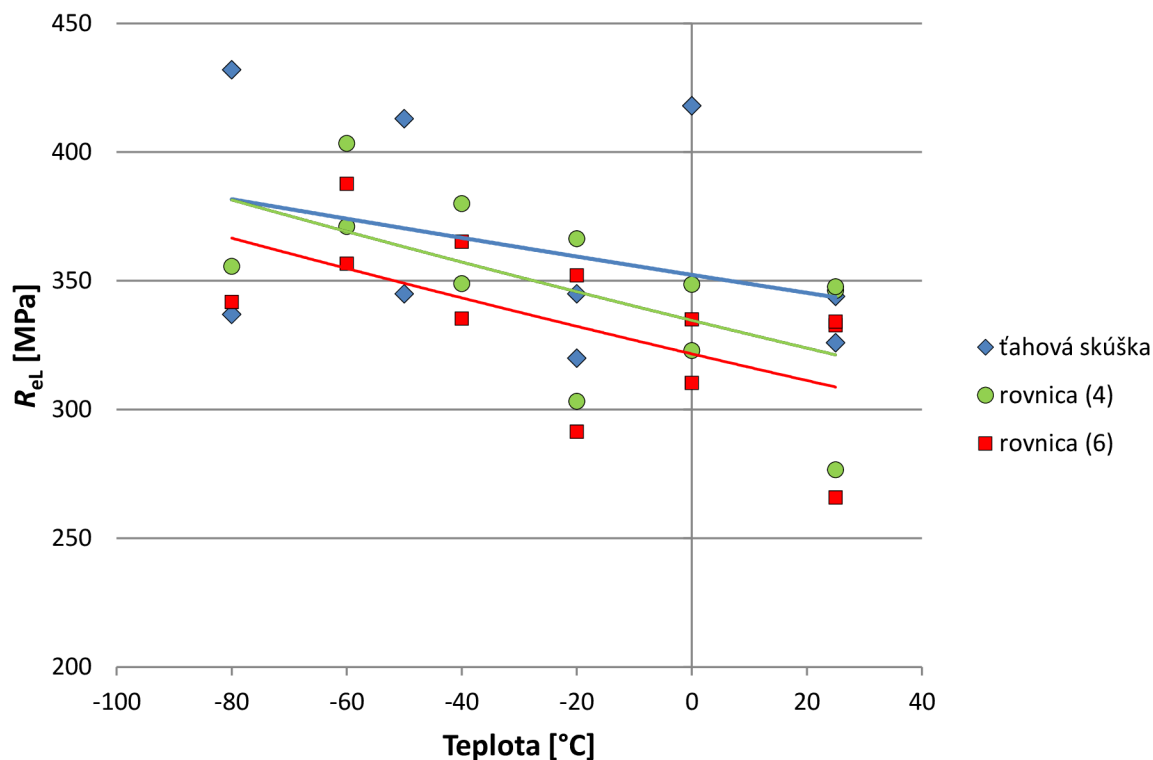
Použitím rov. (6) bola dosiahnutá pomerne dobrá zhoda prepočtu výsledkov penetračných a ťahových skúšok, čo je zrejmé z obr. 51.



Obr. 51 Porovnanie výsledkov prepočtu R_{eL} použitím rov. (6) a (7) so skúškou ťahom

Rov. (6) bola stanovená na väčšej skupine 15 ocelí, jej použitím bola dosiahnutá lepšia zhoda v porovnaní s rov. (7), ktorá výsledky prepočtov nadhodnocuje. Rov. (7) bola stanovená pre oceľ AE460, čo odpovedá podľa ČSN EN 10113/2-95 oceli S460NL, ktorá sa vlastnosťami podobá skúmanému experimentálnemu materiálu, oceli S235 JRC – SA.

Výsledky rov. (4) a (6) s najlepšou zistenou mierou zhody prepočtu na R_{eL} so skúškou ťahom v skúmanom teplotnom intervale sú uvedené na obr. 52. Hodnota sily F_e dosádzaná do výpočtov rov. (4) bola vyhodnotená ako $F_{e_t/10}$ (viď obr. 48).

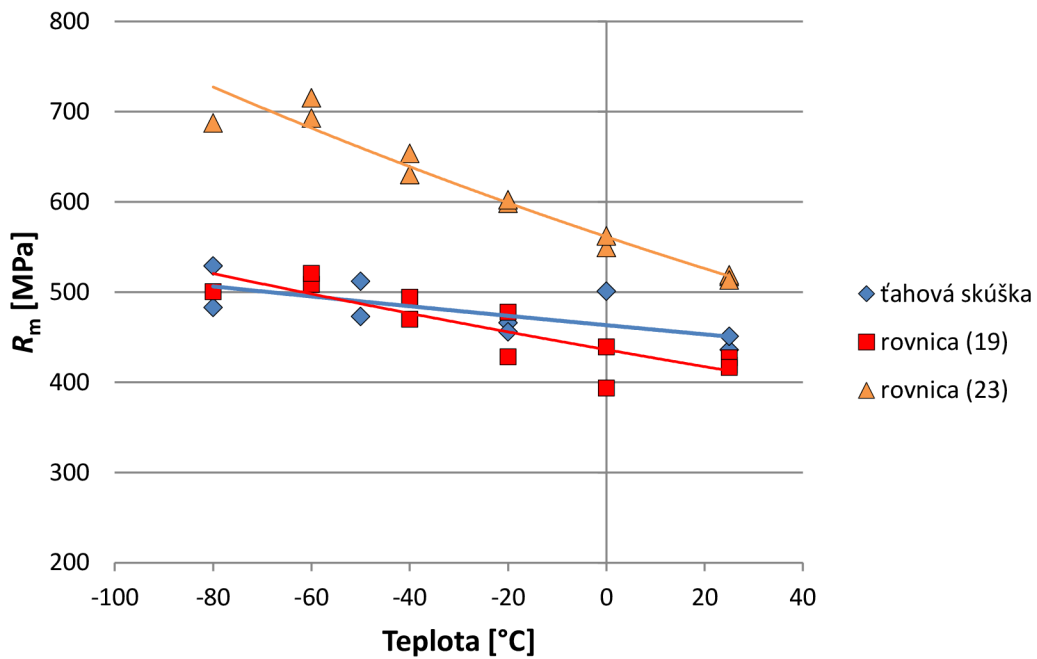


Obr. 52 Porovnanie výsledkov prepočtu R_{eL} použitím najlepších zistených rov. (4) a (6) so skúškou ťahom

5.2.2 Stanovenie teplotnej závislosti medze pevnosti R_m

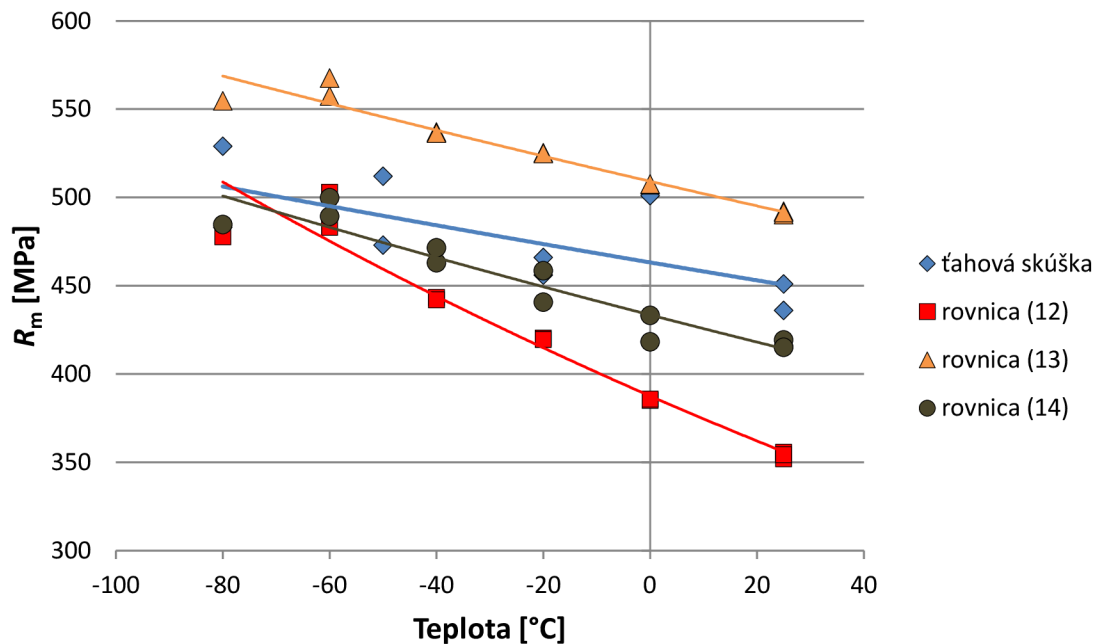
Podobne ako v predchádzajúcej kapitole boli za účelom korelácie použité prepočtové rovnice z teoretickej časti diplomovej práce.

Rov. (19), (21) a (23) boli stanovené viacrozmernou lineárnou regresiou (viď kap. 3.3). Miera zhody korelovaných teplotných závislostí medze pevnosti R_m použitím uvedených rovníc s výsledkami skúšok ťahom je zrejmá z obr. 53. Výsledky rov. (21) preukazujú pre použitý experimentálny materiál záporné hodnoty medze pevnosti R_m , preto nie sú v obr. 53 zahrnuté. Je zrejmé, že použitím rov. (19) bolo dosiahnuté pomerne dobrej zhody prepočtu so skúškou ťahom v skúmanom teplotnom intervale. Rov. (23) výsledky prepočtu nadhodnocuje.



Obr. 53 Porovnanie výsledkov prepočtu R_m použitím rov. (19) a (23) z viacrozmernej lineárnej regresie so skúškou ťahom

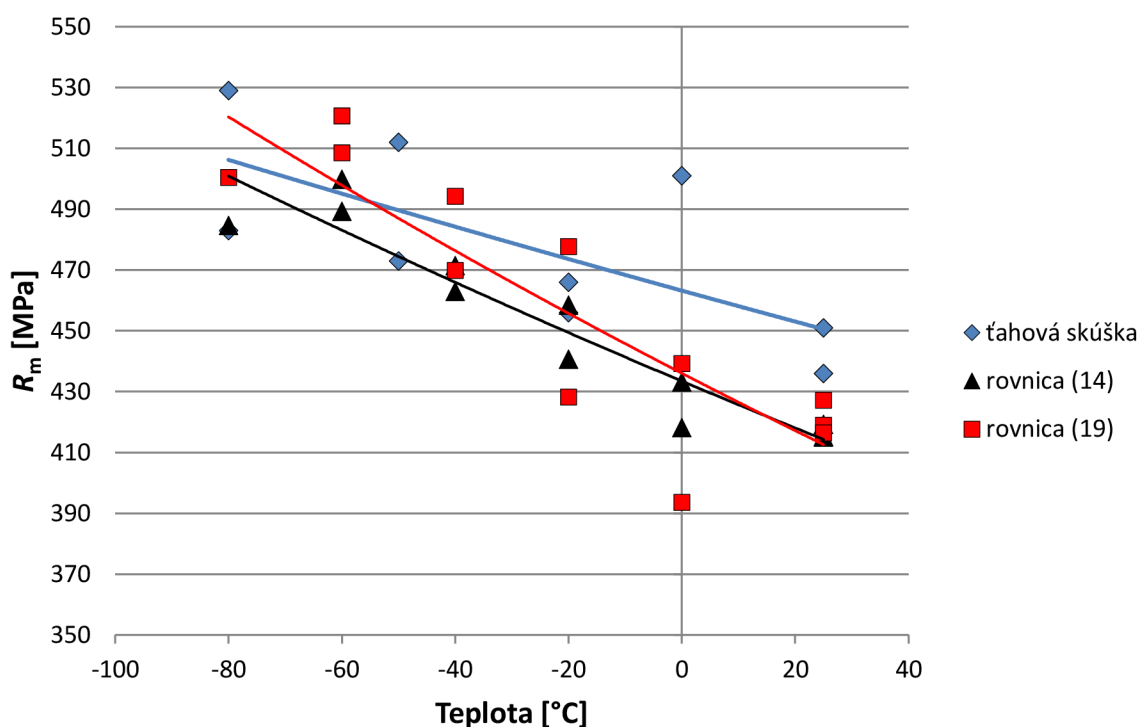
Ďalej boli použité rov. (12)-(14) z literatúry [1, 11] (kap. 3.2), pomocou ktorých bola dosiahnutá rôzna zhoda prepočtu so skúškou ťahom, vid' obr. 54.



Obr. 54 Porovnanie výsledkov prepočtu R_m použitím rov. (12)-(14) so skúškou ťahom

Možno konštatovať, že zo všetkých uvedených rovníc je najlepšej zhody prepočtu na R_m so skúškou ťahom v skúmanom teplotnom intervale možné dosiahnuť použitím prepočtových rov. (14) a (19). Obe spomínané rovnice pri prepočte na medzu pevnosti R_m z výsledkov penetračných skúšok zahŕňajú aj parameter posunutia razníka pri maximálnom zaťažení u_m , čo je v zhode so závermi práce [11], kde autori konštatujú, že zahrnutím spomínaného parametra je možné dosiahnuť najlepšej presnosti prepočtu R_m .

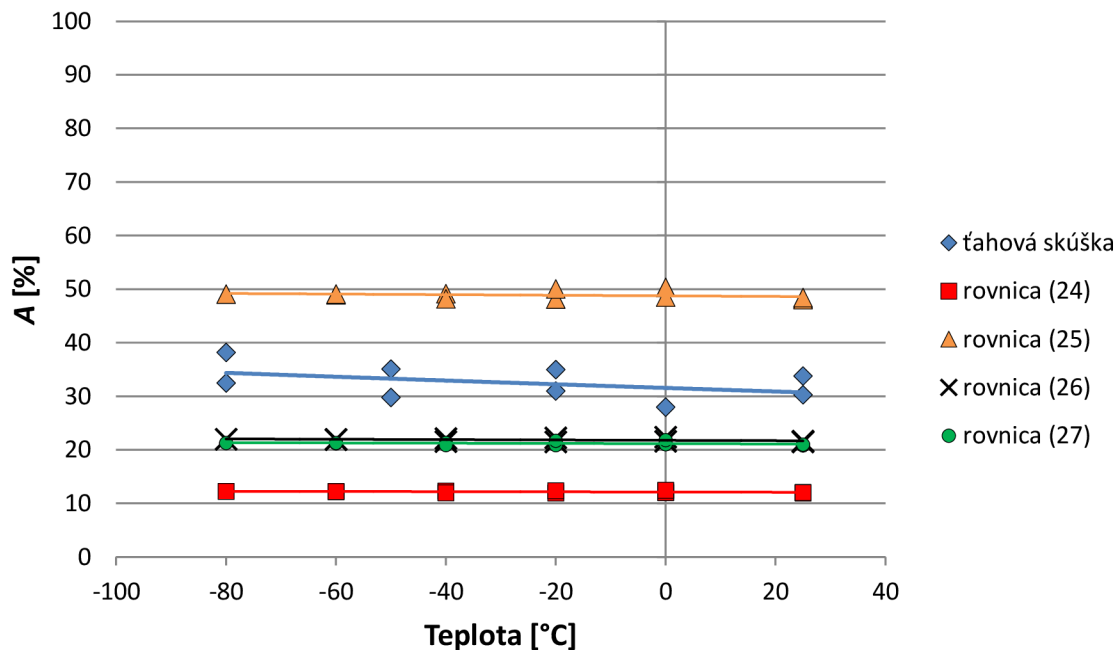
Výsledky rov. (14) a (19) s najlepšou zistenou mierou zhody prepočtu na R_m so skúškou ťahom v skúmanom teplotnom intervale sú uvedené v grafe na obr. 55.



Obr. 55 Porovnanie výsledkov prepočtu R_m použitím najlepších zistených rov. (14) a (19) so skúškou ťahom

5.2.3 Stanovenie teplotnej závislosti ťažnosti A

Za účelom prepočtu na ťažnosť A boli použité rov. (24)-(27) (viď kap. 3.4). Miera zhody korelovaných závislostí využitím uvedených rovníc so skúškou ťahom je zrejmá z obr. 56.



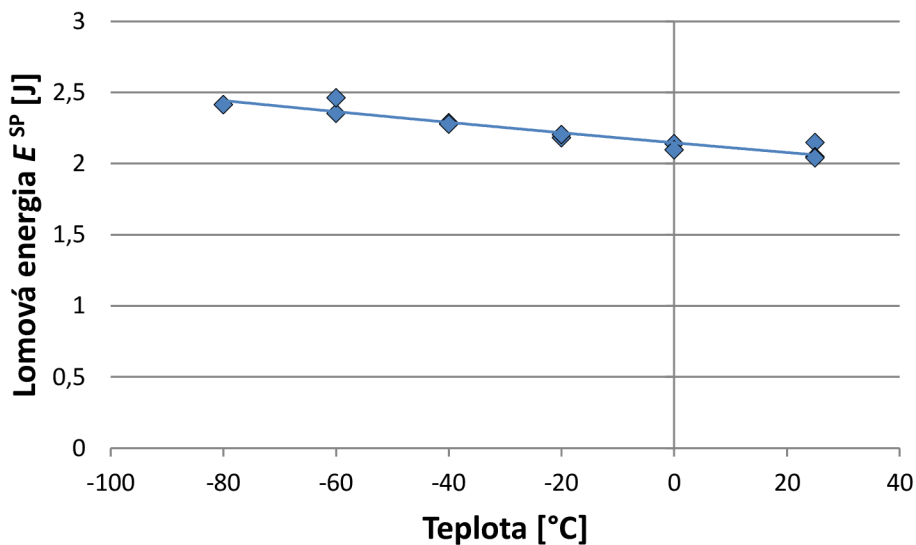
Obr. 56 Porovnanie výsledkov prepočtu A použitím rovníc (24)-(27) so skúškou ťahom

Ako je uvedené v kap. 3.4, použitím žiadnej z uvedených rovníc nie je možné dosiahnuť významnej zhody prepočtu so skúškou ťahom. Najviac sa však k výsledkom skúšky ťahom blížia hodnoty získané rov. (26) a (27), resp. rov. (25).

5.2.4 Stanovenie tranzitnej teploty $FATT$ z výsledkov penetračných skúšok

Ako je uvedené v teoretickej časti diplomovej práce (kap. 3.5), tranzitná teplota T_{SP} stanovená z výsledkov penetračných skúšok býva najčastejšie korelovaná s tranzitnou teplotou $FATT$ stanovenou z výsledkov skúšky rázom v ohybe.

Z dvanástich experimentálnych záznamov penetračných skúšok (Príloha A) bola stanovená plocha pod krivkami jednotlivých závislostí v teplotnom intervale (-80 až $+25$) °C, čím bola stanovená lomová energia E^{SP} jednotlivých záznamov. Závislosť lomovej energie E^{SP} na teplote je uvedená na obr. 57.



Obr. 57 Závislosť lomovej energie E^{SP} na teplote

Nakoľko tranzitná teplota T_{SP} je definovaná ako teplota odpovedajúca polovici súčtu minimálnej a maximálnej lomovej energie E^{SP} v tranzitnej oblasti, treba konštatovať, že zo získaných experimentálnych dát spomínanú tranzitnú teplotu nie je možné stanoviť, nakoľko sa v danom teplotnom intervale nevyskytuje tranzitná oblasť (obr. 57). Koreláciu na tranzitnú teplotu *FATT* preto taktiež nie je možné vykonať.

Ako je uvedené v kap. 3.5, tranzitné správanie je v prípade penetračných skúšok možné pozorovať pri nižších teplotách v porovnaní so skúškou rázom v ohybe. Uvedená skutočnosť odpovedá experimentálnym výsledkom.

5.3 Fraktografická analýza porušených vzoriek pre penetračné skúšky

Vzhľadom na skutočnosť, že v skúšanom teplotnom intervale v prípade penetračných skúšok nebola nájdená tranzitná oblasť (nedošlo k skrehnutiu materiálu), dá sa predpokladať, že prevláda tvárny mechanizmus porušenia vzoriek. Experimentálne boli analyzované tvary tzv. „klobúčikov“ z porušených skúšobných vzoriek s ohľadom na teplotu skúšania (viď Príloha B). Charakteristické šírenie trhliny v tangenciálnom smere, resp. porušovanie skúšobných vzoriek v tvare tzv. „čapičky“ v záverečnej fázi lomu potvrdzuje oprávnenosť predpokladu tvárneho mechanizmu porušenia vzoriek v skúšanom teplotnom intervale.

V práci [15] bola vykonaná fraktografická analýza SPT vzorky z ocele AE460 porušenej pri teplote -85 °C, viď obr. 13. Zistený bol tvárny mechanizmus porušenia. Uvedená ocel sa chemickým zložením a mechanickými vlastnosťami podobá nášmu experimentálnemu materiálu, oceli S235 JRC – SA. V uvedenej práci autori uvádzajú, že tvárne porušenie sa vyskytuje pri teplotách vyšších ako -100 °C. Naopak, čisto štepné porušenie vzoriek je možné pozorovať pri teplotách nižších ako -140 °C, viď obr. 12. Zmiešaný mechanizmus porušovania je pozorovateľný v tranzitnej oblasti medzi uvedenými teplotami.

6 ZÁVER

Predkladaná diplomová práca sa zaoberá skúšobnou metódou *Small Punch Test*, tzv. penetračnou skúškou. Teoretická časť práce poskytuje komplexný prehľad o uvedenej metóde skúšania. Pojednáva o hlavných dôvodoch jej zavádzania a vývoja počínajúc odberom materiálu, prípravou vzoriek, vysvetlením základného princípu skúšania na miniatúrnych diskoch a rozdelením penetračných skúšok podľa rôznych kritérií. Popísané sú charakteristické veličiny stanoviteľné zo záznamov penetračných skúšok a spôsoby ich vyhodnotenia. Jedna z kapitol popisuje v súčasnosti jediný oficiálne vydaný dokument, technickú dohodu CWA 15267, ktorá združuje skúšobné postupy a požiadavky pre vykonanie penetračných skúšok. Ďalej sú naznačené hlavné prednosti a obmedzenia, s ktorými sa potýkame pri penetračných skúškach. Kapitola 3 predstavuje hlavnú informačnú základňu pre stanovenie konvenčných hodnôt základných mechanických charakteristík z výsledkov časovo nezávislých penetračných skúšok využitím prepočtových rovníc.

Jedným z hlavných cieľov experimentálnej časti práce bolo posúdiť mieru zhody teplotných závislostí mechanických vlastností stanovených z výsledkov penetračných skúšok s výsledkami štandardných skúšok (skúška ťahom a skúška rázom v ohybe) v rovnakom intervale teplôt (-80 až $+25$) °C. Na začiatku bolo potrebné konštrukčne navrhnuť vhodný skúšobný prípravok pre realizáciu penetračných skúšok v uvedenom teplotnom intervale. Laboratórne bolo pripravených vyše 60 kusov SPT vzoriek z ocele S235 JRC - SA. Vykonaním penetračných skúšok bolo získaných 12 záznamov *zaťaženie – posunutie* razníka pokrývajúcich uvedený teplotný interval.

Na základe výsledkov experimentálnej práce možno pre použitú feriticko-perlitickú oceľ formulovať nasledujúce závery.

- Bol konštrukčne navrhnutý a vyrobený skúšobný prípravok pre penetračné skúšky.
- Boli vykonané série penetračných skúšok, skúšok ťahom a skúšok rázom v ohybe.
- Najlepšej zhody prepočtu výsledkov SPT so skúškou ťahom je v prípade teplotnej závislosti medze klzu R_{eL} v skúšanom teplotnom intervale možné dosiahnuť použitím prepočtových rov. (4) a (6). V prípade rov. (4) je hodnotu sily F_e potrebné vyhodnocovať spôsobom $F_{e_{v10}}$, ktorý odporúča taktiež väčšina autorov.
- V prípade teplotnej závislosti R_m je najlepšej zhody prepočtu so skúškou ťahom v skúšanom teplotnom intervale možné dosiahnuť použitím prepočtových rov. (14) a (19). Obe uvedené rovnice obsahujú parameter posunutia razníka pri maximálnom zaťažení u_m , čo je v súlade so závermi ďalších autorov.
- Z experimentov vyplýva, že z výsledkov penetračných skúšok nie je možné spoľahlivo stanoviť hodnotu konvenčnej ťažnosti A , čo je v zhode so závermi viacerých autorov. Najviac sa k výsledkom skúšky ťahom blížia hodnoty získané rov. (26) a (27), resp. rov. (25).
- Zo záznamov penetračných skúšok bola vyhodnotená teplotná závislosť lomovej energie E^{SP} . Bolo zistené, že v skúšanom teplotnom intervale sa nenachádza tranzitná oblasť, tým pádom tranzitnú teplotu T_{SP} z experimentálnych výsledkov nie je možné stanoviť. Z uvedeného dôvodu taktiež nebolo možné vykonať prepočet na tranzitnú teplotu $FATT$. Tranzitné správanie z výsledkov penetračných skúšok je možné pozorovať pri nižších teplotách v porovnaní so skúškou rázom v ohybe, čo je v súlade

so závermi viacerých literárnych zdrojov. Tranzitná teplota *FATT* stanovená skúškou rázom v ohybe *FATT* = -5 °C.

- Vzhľadom na skutočnosť, že v prípade penetračných skúšok nedošlo k skrehnutiu materiálu a v skúmanom teplotnom intervale nebola nájdená tranzitná oblasť, predpokladá sa prevažne tvárny mechanizmus porušenia skúšobných vzoriek. Oprávnenosť tohto predpokladu je založená na tvare trhliny a spôsobe oddelenia materiálu vzorky v tvare „čapičky“ v záverečnej fáze lomu.
- Všeobecne možno konštatovať, že miera zhody korelovaných mechanických parametrov s výsledkami štandardných skúšok je závislá najmä od voľby vhodných prepočtových rovníc. Potvrdil sa predpoklad, že najlepšiu zhodu vykazujú prepočtové rovnice stanovené pre podobný typ materiálu (skupiny materiálov), pričom podobnosť je daná nielen chemickým zložením, ale aj úrovňou mechanických vlastností (t. j. okrem iného aj spôsobom tepelného spracovania).

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] MATOCHA, Karel. *Hodnocení mechanických vlastností konstrukčních ocelí pomocí penetračních testů*. Vyd. 1. Ostrava: Materiálový a metalurgický výzkum, 2010, 73 s., ISBN 978-80-248-2223-5.
- [2] HURST, Roger, Karel MATOCHA. The European Code of Practise for Small Punch Testing - where do we go from here?. In: *Determination of Mechanical Properties of Materials by Small Punch and Other Miniature Testing Techniques: conference proceedings : the 1st International Conference SSTT : August 31 to September 2, 2010: Ostrava, Czech Republic*. Ostrava: Ocelot, 2010, s. 5-11. ISBN 978-80-254-7994-0.
- [3] BREZINA, Martin, Jana PETZOVÁ a Ludovít KUPCA. Evaluation of Mechanical Properties of Primary Circuit Components Using SPT Technique. In: Volume 1A: Codes and Standards [online]. ASME, 2013-7-14, V01AT01A041- [cit. 27.1. 2016]. ISBN 978-0-7918-5563-8. DOI: 10.1115/PVP2013-97170. Dostupné z: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?doi=10.1115/PVP2013-97170>
- [4] PETZOVÁ, Jana, Martin BREZINA a Ludovít KUPCA. Evaluation of Mechanical Properties of the Reactor Pressure Vessel Materials Changes by Small Punch Test Application. *Volume 1A: Codes and Standards* [online]. ASME, 2013-7-14, V01AT01A042- [cit. 2016-01-27]. DOI: 10.1115/PVP2013-97171. Dostupné z: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?doi=10.1115/PVP2013-97171>
- [5] STRATFORD, G. C., F. DI PERSIO a J. KLAPUT. Miniaturised creep testing using the small punch (SP) test technique. In: *11 th International Conference on Fracture* [online]. Turin: Elsevier, 2005 [cit. 2016-01-27]. Dostupné z: <http://www.gruppofrattura.it/ocs/index.php/ICF/ICF11/paper/download/10102/9485>
- [6] PURMENSKÝ, Jaroslav a Karel MATOCHA. Zkoušení pomocí malých vzorků ve fyzikální metalurgii. In: *Metal 2001* [online]. 2001 [cit. 2016-01-27]. Dostupné z: http://konsys-t.tanger.cz/files/proceedings/metal_01/papers/70.pdf
- [7] BŘEZINA, MARTIN a LUDOVÍT KUPČA. Možnosti využitia systému na odber malých vzoriek z prevádzkovaných zariadení pri hodnotení vlastností materiálov. *Chemické listy* [online]. Praha: Česká společnost chemická, 2011, roč. 105, s. 167-170 [cit. 2016-01-27]. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2011_s2_s167-s170.pdf
- [8] CWA 15627. Small Punch Test Method for Metallic Materials: CEN Workshop Agreement. Brusel: CEN, 2007, 70 s.

- [9] BALÁK, Miloš, Martin BŘEZINA a Zdenka RAPANTOVÁ. Mass-production of SPT specimen. In: *Determination of Mechanical Properties of Materials by Small Punch and Other Miniature Testing Techniques: conference proceedings : the 1st International Conference SSTT : August 31 to September 2, 2010 : Ostrava, Czech Republic*. Ostrava: Ocelot, 2010, s. 87-89. ISBN 978-80-254-7994-0.
- [10] GUDURU, R.K., K.A. DARLING, R. KISHORE, R.O. SCATTERGOOD, C.C. KOCH a K.L. MURTY. Evaluation of mechanical properties using shear-punch testing. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2005, vol. 395, 1-2, s. 307-314 [cit. 2016-04-26]. DOI: 10.1016/j.msea.2004.12.048. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509305000201>
- [11] GARCÍA T.E., C. RODRÍGUEZ, F.J. BELZUNCE a C. SUÁREZ. Estimation of the mechanical properties of metallic materials by means of the small punch test. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014, č. 582, 708–717.
- [12] KLEVTSOV, Ivan, Andrei DEDOV a Artjom MOLODTSOV. Using of small punch test for determination of tensile properties for power plant steels. In: 6th International DAAAM Baltic Conference. Tallinn: INDUSTRIAL ENGINEERING, 2008, 5 s. Dostupné z: <http://innomet.ttu.ee/daaam08/Online/Materials%20Engineering/Dedov.pdf>
- [13] MA, Young Wha a Kee Bong YOON. Assessment of tensile strength using small punch test for transversely isotropic aluminum 2024 alloy produced by equal channel angular pressing. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2010, vol. 527, 16-17, s. 3630-3638 [cit. 2016-03-24]. DOI: 10.1016/j.msea.2010.02.057. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509310002236>
- [14] KARTHIK, V., P. VISWESWARAN, A. VIJAYRAGHAVAN, K.V. KASIVISWANATHAN a Baldev RAJ. Tensile-shear correlations obtained from shear punch test technique using a modified experimental approach. *Journal of Nuclear Materials* [online]. 2009, **393**(3), 425-432 [cit. 2016-04-09]. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2009.06.027. ISSN 00223115. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022311509006904>
- [15] CONTRERAS, M. A., C. RODRÍGUEZ, F. J. BELZUNCE a C. BETEGÓN. Use of the small punch test to determine the ductile-to-brittle transition temperature of structural steels. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* [online]. 2008, **31**(9), 727-737 [cit. 2016-04-10]. DOI: 10.1111/j.1460-2695.2008.01259.x. ISSN 8756758x. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1460-2695.2008.01259.x>
- [16] LINSE, T., M. KUNA, J. SCHUHKNECHT a H.-W. VIEHRIG. Usage of the smallpunch-test for the characterisation of reactor vessel steels in the brittle-ductile transition region. *Engineering Fracture Mechanics* [online]. 2008, vol. 75, issue 11, s. 3520-3533 [cit. 2016-04-10]. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2007.03.047. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013794407002160>

- [17] GUAN, Kai-shu, Tong XU, Xiao-cheng ZHANG a Zhi-wen WANG. Effect of microdefects on load-deflection of small punch test by experimental investigation and finite element analysis. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* [online]. 2013, vol. 110, s. 14-16 [cit. 2016-04-10]. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2013.04.016. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0308016113000720>
- [18] EGAN, Patrick, Maurice P. WHELAN, Fereydoun LAKESTANI a Michael J. CONNELLY. Small punch test: An approach to solve the inverse problem by deformation shape and finite element optimization. *Computational Materials Science* [online]. 2007, 40(1), 33-39 [cit. 2016-04-16]. DOI: 10.1016/j.commatsci.2006.10.021. ISSN 09270256. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927025606003132>
- [19] FLEURY, E. a J.S. HA. Small punch tests to estimate the mechanical properties of steels for steam power plant: I. Mechanical strength. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* [online]. 1998, 75(9), 699-706 [cit. 2016-04-17]. DOI: 10.1016/S0308-0161(98)00074-X. ISSN 03080161. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030801619800074X>
- [20] RODRÍGUEZ C., J. GARCÍA, E. CÁRDENAS a C. BETEGÓN. Mechanical properties characterization of heat-affected zone using the small punch test. *Welding Journal*. 2009, č. 88, 188–192.
- [21] NORRIS S.D a J.D. PARKER. Deformation processes during disc bend loading. *Materials Science and Technology*. 1996, č. 12, 163-170.
- [22] VARNER, Miroslav; KOULA, Václav; KRAUSOVÁ, Hana. SPT RESULTS EVALUATION. Dostupné z: http://www.davar.cz/corfat/pdf/Varner_Koula_Krausova_SPT_results_evaluation.pdf
- [23] VARNER, Miroslav, Václav KOULA a Josef VOLÁK. *INFLUENCE OF INSTRUMENTATION IMPERFECTIONS ON SPT RESULTS* [online]. Dostupné z: http://www.davar.cz/corfat/pdf/Varner_Koula_Volak_Vliv_imperfekci_instrumentace_na_vysledky.pdf
- [24] FINARELLI, D., F. CARSUGHI a P. JUNG. The small ball punch test at FZJ. *Journal of Nuclear Materials* [online]. 2008, 377(1), 65-71 [cit. 2016-04-26]. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2008.02.053. ISSN 00223115. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022311508001177>
- [25] ASSAS, Majid Matouq, Asif HUSAIN a D.K. SEHGAL. Identification of mechanical characteristics of materials using diminutive specimen-an empirical study. *Procedia Engineering* [online]. 2011, 10, 3109-3116 [cit. 2016-04-26]. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.04.515. ISSN 18777058. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S187770581100703X>

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

Symbol	Jednotka	Popis
$R_e, R_{p0.2}$	[MPa]	medza klzu stanovená zo štandardnej ťahovej skúšky
R_{eL}	[MPa]	dolná medza klzu zo štandardnej ťahovej skúšky (tzv. výrazná R_e)
R_{eH}	[MPa]	horná medza klzu zo štandardnej ťahovej skúšky (tzv. výrazná R_e)
R_m	[MPa]	medza pevnosti stanovená zo štandardnej ťahovej skúšky
A	[%]	ťažnosť stanovená zo štandardnej ťahovej skúšky
Z	[%]	kontrakcia stanovená zo štandardnej ťahovej skúšky
h_0	[mm]	počiatočná hrúbka skúšobnej vzorky SPT
h_f	[mm]	minimálna hrúbka porušenej vzorky SPT
F	[N]	zaťaženie aplikované na skúšobnú vzorku SPT
r	[mm]	polomer razníka
r_m	[mm]	zaoblenie spodnej opernej matrice
D	[mm]	priemer pretláčacieho otvoru spodnej matrice
d	[mm]	priemer kontaktnej časti, resp. priemer skúšobnej vzorky
F_m	[N]	maximálna hodnota sily získaná pri penetračnej skúške, sila na medzi pevnosti SPT
u_m	[mm]	posunutie razníka pri maximálnej sile F_m
F_f	[N]	lomová sila pri SPT, (zmluvne definovaná ako $F_f = 0,8 F_m$)
u_f	[mm]	posunutie razníka v momente lomu skúšobnej vzorky pri lomovej sile F_f
F_e	[N]	sila prechodu z elastickej do plastickej oblasti, sila na medzi klzu SPT
E^{SP}	[J]	lomová energia SPT (plocha pod krivkou závislosti <i>zaťaženie – posunutie razníka</i>)
ε_f	[-]	efektívna lomová deformácia, $\varepsilon_f = \ln(h_0/h_f)$
T_{SP}	[°C] / [°K]	tranzitná teplota penetračnej skúšky
$FATT$	[°C] / [°K]	tranzitná teplota odpovedajúca 50% tvárneho lomu na lomovej ploche stanovená skúškou rázom v ohybe

T_{27J}	[°C] / [°K]	teplota odpovedajúca nárazovej práci 27J stanovenej skúškou rázom v ohybe
F_{e_Mao}	[N]	sila na medzi klzu SPT stanovená podľa Mao
F_{e_CEN}	[N]	sila na medzi klzu SPT stanovená doporučením podľa CEN
$F_{e_t/10}$	[N]	sila na medzi klzu SPT stanovená priesečníkom krivky záznamu s rovnobežkou plastickej tangenciály vo vzdialenosti $0,1h_0$
$F_{e_t/100}$	[N]	sila na medzi klzu SPT stanovená priesečníkom krivky záznamu s rovnobežkou plastickej tangenciály vo vzdialenosti $0,01h_0$
F_{e_INF}	[N]	sila na medzi klzu SPT stanovená v mieste odklonu priamky prekladajúcej lineárnu časť záznamu
E	[GPa]	modul pružnosti
μ	[-]	Poissonove číslo
f	[-]	súčiniteľ trenia
Ch	[mm]	zrazenie hrany spodnej matrice skúšobného prípravku
P	[mm]	odchýlka od rovnobežnosti dosadacej plochy vzorky skúšobného prípravku pre penetračné skúšky
α_1, α_2	[-]	regresné parametre priamky
β_1, β_2	[-]	regresné parametre priamky
σ	[MPa]	skutočné napätie
ε_p	[%]	plastická deformácia
k	[MPa]	koeficient deformačného spevnenia
n	[-]	exponent deformačného spevnenia
γ, γ'	[-]	empirická konštanta pri prepočte na konvenčnú ťažnosť A
b, β, C	[-]	regresné parametre
KV	[J]	nárazová práca stanovenej skúškou rázom v ohybe
P_L	[%]	podiel tvárneho lomu na lomovej ploche

Skratka	Popis
SPT	<i>Small Punch Test</i> – penetračná skúška
TEM	transmisná elektrónová mikroskopia
EDM	<i>electrical discharge machine</i> – zariadenie na elektroiskrové rezanie
CDR	<i>constant deflection rate</i> – konštantná rýchlosť posuvu
CF	<i>constant force</i> – konštantné zaťaženie
NDT	nedeštruktívne metódy skúšania
MKP	metóda konečných prvkov
TOZ	tepelne ovplyvnená zóna
ECAP	<i>Equal Channel Angular Pressing</i> – technológia bezkontrakčného pretláčania
BCC	<i>body centered cubic</i> – telesovo centrovaná kubická mriežka
ÚMVI	Ústav materiálových vied a inžinýrství
SA	<i>soft annealing</i> - žihanie na mäkko

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1 Schéma zariadenia <i>SSamTM-2</i> spoločnosti <i>Rolls-Royce</i> [3].....	2
Obr. 2 Zariadenie na princípe elektroiskrového rezania [8].....	3
Obr. 3 Najčastejšie používaný rozmer vzoriek pre penetračné skúšky	3
Obr. 4 Programovateľné zariadenie na princípe elektroiskrového rezania [9]	4
Obr. 5 Vzorky oddelené programovateľným zariadením EDM [2]	4
Obr. 6 Schematické usporiadanie penetračnej skúšky	5
Obr. 7 Geometria razníka pre guľôčkovú penetračnú skúšku.....	7
Obr. 8 Geometria razníka pre guľôčkovú penetračnú skúšku, konfigurácia použitá v rámci predkladanej diplomovej práce	7
Obr. 9 Schéma strihovej penetračnej skúšky [14].....	7
Obr. 10 Schéma ohybovej penetračnej skúšky, upravené podľa [1].....	8
Obr. 11 Závislosť <i>zaťaženie – posunutie razníka</i> získaná z guľôčkovej penetračnej skúšky pri teplote 25°C.....	9
Obr. 12 Štepny mechanizmus porušovania, vzorka z ocele AE460 porušená pri teplote -140°C [15]	10
Obr. 13 Tvárny mechanizmus porušovania, vzorka z ocele AE460 porušená pri teplote -85°C [15]	11
Obr. 14 Rôzne spôsoby stanovenia sily F_e , upravené podľa [11]	12
Obr. 15 Vplyv orientácie štandardných vzoriek pre skúšky rázom v ohybe na získanú teplotnú závislosť nárazovej práce (vpravo) a orientácie vzoriek pre penetračné skúšky na závislosť lomovej energie (vľavo) na oceli 15 128 [1].....	16
Obr. 16 Usporiadanie geometrického modelu v systéme ANSYS [23].....	17
Obr. 17 Deformácia v konečnej etape penetračnej skúšky [23].....	18
Obr. 18 Rozloženie Von Misesovho napätia v konečnej etape penetračnej skúšky [23].....	18
Obr. 19 Závislosti <i>zaťaženie – posunutie</i> razníka stanovené simuláciami MKP a experimentálne [23].....	18
Obr. 20 Vplyv veľkosti fixačnej sily skúšobnej vzorky na výslednú závislosť <i>zaťaženie – posunutie</i> razníka [23].....	19
Obr. 21 Vplyv geometrických nepresností spodnej matrice skúšobného prípravu na výslednú závislosť <i>zaťaženie – posunutie</i> razníka [23]	20
Obr. 22 Vplyv hodnoty koeficientu trenia f na závislosť <i>zaťaženie – posunutie</i> razníka [23].	21
Obr. 23 Porovnanie vzorky pre skúšku ťahom (vľavo) a vzorky pre penetračnú skúšku (vpravo)	22
Obr. 24 Rozloženie Von Misesovho napätia vo vzorke v priebehu skúšky ťahom	23
Obr. 25 Rozloženie Von Misesovho napätia vo vzorke v priebehu penetračnej skúšky [18]..	23

Obr. 26 Záznamy penetračných skúšok modelových ocelí získané numerickou simuláciou MKP [22]	29
Obr. 27 Závislosť medze pevnosti R_m na maximálnej sile penetračnej skúšky F_m pre rôzne hodnoty exponentu deformačného spevnenia n [22].....	30
Obr. 28 Závislosť medze klzu $R_{p0,2}$ na maximálnej sile penetračnej skúšky F_m pre rôzne hodnoty exponentu deformačného spevnenia n [22].....	30
Obr. 29 Stanovenie prepočtovej rovnice na medzu klzu R_e [22].....	31
Obr. 30 Závislosti <i>zaťaženie – posunutie</i> získané vykonaním penetračných skúšok na oceli AE460 v teplotnom rozsahu (-140 až $+20$)°C [15]	34
Obr. 31 Tranzitné krivky získané z penetračnej skúšky a zo skúšky rázom v ohybe [15]	35
Obr. 32 Teplotná závislosť charakteristických síl F_e a F_m normalizovaných počiatočnou hrúbkou h_0 , upravené podľa [15]	36
Obr. 33 Univerzálny skúšobný stroj Zwick Z250 v konfigurácii s navrhnutým skúšobným prípravkom pre penetračné skúšky	38
Obr. 34 Upínací prípravok skúšobného stroja.....	39
Obr. 35 Jedno z možných konštrukčných riešení skúšobného prípravku	39
Obr. 36 Konečné konštrukčné riešenie skúšobného prípravku	39
Obr. 37 Rez realizovaného skúšobného prípravku pre penetračné skúšky	40
Obr. 38 Usporiadanie jednotlivých častí skúšobného prípravku.....	40
Obr. 39 Štruktúra ocele S235 JRC – SA, pozdĺžny smer L, Nital, zväčšenie $200\times$	42
Obr. 40 Štruktúra ocele S235 JRC – SA, priečny smer T, Nital, zväčšenie $200\times$	43
Obr. 41 Metalografická brúska <i>Struers Pedemin-2</i>	44
Obr. 42 Presná diamantová rezačka <i>Leco VC-50</i>	44
Obr. 43 Teplotná závislosť dolnej medze klzu R_{eL} stanovená zo skúšky ťahom.....	45
Obr. 44 Teplotná závislosť medze pevnosti R_m stanovená zo skúšky ťahom.....	46
Obr. 45 Teplotná závislosť ťažnosti A stanovená zo skúšky ťahom	46
Obr. 46 Teplotná závislosť kontrakcie Z stanovená zo skúšky ťahom	47
Obr. 47 Stanovenie tranzitných teplôt T_{27J} a $FATT$ z výsledkov skúšky rázom v ohybe.....	48
Obr. 48 Vplyv spôsobu stanovenia sily F_e na mieru zhody výsledkov penetračných skúšok s výsledkami skúšok ťahom pri použití prepočtovej rov. (4).....	50
Obr. 49 Vplyv spôsobu stanovenia sily F_e na mieru zhody výsledkov penetračných skúšok s výsledkami skúšok ťahom pri použití prepočtovej rov. (5).....	50
Obr. 50 Porovnanie výsledkov prepočtu R_{eL} použitím rov. (18), (20) a (22) z viacrozmernej lineárnej regresie so skúškou ťahom	51
Obr. 51 Porovnanie výsledkov prepočtu R_{eL} použitím rov. (6) a (7) so skúškou ťahom.....	52
Obr. 52 Porovnanie výsledkov prepočtu R_{eL} použitím najlepších zistených rov. (4) a (6) so skúškou ťahom	53

Obr. 53 Porovnanie výsledkov prepočtu R_m použitím rov. (19) a (23) z viacrozmernej lineárnej regresie so skúškou ťahom	54
Obr. 54 Porovnanie výsledkov prepočtu R_m použitím rov. (12)-(14) so skúškou ťahom	54
Obr. 55 Porovnanie výsledkov prepočtu R_m použitím najlepších zistených rov. (14) a (19) so skúškou ťahom	55
Obr. 56 Porovnanie výsledkov prepočtu A použitím rovníc (24)-(27) so skúškou ťahom	56
Obr. 57 Závislosť lomovej energie E^{SP} na teplote	57

ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 1 Najčastejšie používané porovnávacie parametre X pri prepočte na medzu klzu R_e	25
Tabuľka 2 Najčastejšie využívané porovnávacie parametre X pri prepočte na medzu pevnosti R_m	26
Tabuľka 3 Parametre Holomonovho vzťahu a mechanické vlastnosti modelových ocelí [22]	29
Tabuľka 4 Empirické vzťahy stanovené viacrozmernou lineárnou regresiou k získaniu konvenčných hodnôt medze klzu R_e a medze pevnosti R_m dosadením parametrov z penetračných skúšok, upravené podľa [22]	32
Tabuľka 5 Popis jednotlivých súčiastok zostavy skúšobného prípravku.....	40
Tabuľka 6 Chemické zloženie ocele S235 JRC – SA (hm. %).....	41
Tabuľka 7 Chemické zloženie ocele S235 JRC podľa materiálového listu (hm. %).....	41
Tabuľka 8 Mechanické vlastnosti ocele S235 JRC uvedené v materiálom liste.....	41
Tabuľka 9 Charakteristické sily a veličiny stanovené zo záznamov penetračných skúšok	49

ZOZNAM PRÍLOH

- A. ZÁZNAMY PENETRAČNÝCH SKÚŠOK
- B. PRIEČNE REZY PORUŠENÝCH SKÚŠOBNÝCH VZORIEK
- C. METALOGRAFICKÉ VÝBRUSY POUŽITÉHO
EXPERIMENTÁLNEHO MATERIÁLU
- D. ZÁZNAMY SKÚŠOK ŤAHOM
- E. TABUĽKOVÁ PRÍLOHA