



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

**POSOUZENÍ VLIVU ORIENTACE ZKUŠEBNÍHO TĚLESA
NA TRANZITNÍ TEPLITU TSP URČENOU POMOCÍ
PROTLAČOVACÍCH ZKOUŠEK NA MINIATURNÍCH
DISCÍCH**

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF THE SPECIMEN ORIENTATION ON THE TRANSITION
TEMPERATURE TSP DETERMINED USING SMALL PUNCH TEST METHOD

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Renáta Tomková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Libor Válka, CSc.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

| | |
|-------------------|---------------------------------------|
| Ústav: | Ústav materiálových věd a inženýrství |
| Studentka: | Bc. Renáta Tomková |
| Studijní program: | Aplikované vědy v inženýrství |
| Studijní obor: | Materiálové inženýrství |
| Vedoucí práce: | Ing. Libor Válka, CSc. |
| Akademický rok: | 2016/17 |

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:

Posouzení vlivu orientace zkušebního tělesa na tranzitní teplotu TSP určenou pomocí protlačovacích zkoušek na miniaturních discích

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Hodnoty nárazové práce KV a dalších charakteristik plynoucích ze zkoušky rázem v ohybu (ZRO) jsou v případě tvářených materiálů významně závislé na orientaci zkušebního tělesa (vrubu) vůči směru tváření polotovaru.

Při hodnocení tranzitního lomového chování pomocí protlačovacích zkoušek na miniaturních discích (SPT) jsou příslušné tranzitní teploty korelovány s hodnotami tranzitních teplot zavedených v rámci ZRO. Vystává tedy otázka, zda existuje stejně silná závislost na orientaci zkušebního tělesa pro SPT vůči směru tváření materiálu, jako je tomu v případě zkušebních těles pro ZRO. Názory na tuto problematiku se různí. V mnoha pracích je uváděno, že taková závislost prakticky neexistuje, popř. je velmi slabá a tedy z praktického hlediska zanedbatelná, existují však práce, kde je dokladován opačný názor.

Cíle diplomové práce:

Náplní a cílem diplomové práce bude posoudit vliv orientace zkušebního tělesa na tranzitní teplotu TSP, která je užívána pro popis tranzitního chování pomocí protlačovacích zkoušek na miniaturních discích (small punch tests). Jako experimentální materiál bude využita ocel pro výrobu lopatek kompresorů. Experimentální část práce bude založena na provedení a vyhodnocení sérií zkoušek rázem v ohybu a protlačovacích zkoušek v jistém teplotním intervalu s ohledem na různou orientaci zkušebních těles vůči směru tváření materiálu polotovarů použitých k jejich výrobě.

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na posouzení vlivu orientace zrn tvářeného materiálu při penetračních zkouškách na miniaturních discích. Jako experimentální materiál byla zvolena ocel ČSN 41 2014, resp. její ekvivalent ocel RFe80, W.-Nr. 1.104. Výsledné záznamy z průběhů penetračních zkoušek byly vyhodnoceny pomocí již známých korelačních vztahů uváděných v literatuře a srovnány s hodnotami naměřenými standardními zkouškami (zkouškou rázem v ohybu a zkouškou tahem). V práci je diskutován vliv axiální, radiální a tangenciální orientace zrn v souvislosti s tranzitním lomovým chováním oceli.

KLÍČOVÁ SLOVA

Penetrační zkoušky na miniaturních discích, zkouška rázem v ohybu, tranzitní teplota, orientace zkušebních těles, ocel 12 014.

ABSTRACT

The diploma thesis is aimed to assesment of the influence of the specimen orientation during the Small Punch Tests (SPT). Steel ČSN 41 0214, or its equivalent steel RFe80, W.-Nr. 1.104 was chosen for experiments. Resulting records from SPT were evaluated using already known correlations which are reported in literature. The correlation values were compared with values obtained by the standard tests like Charpy impact test and tensile test. The influence of axial, radial and tangential test specimens orientation is discussed in relation to Ductile-to-Brittle fracture behaviour of the steel.

KEYWORDS

Small punch tests, Charpy impact test, Ductile-to-Brittle Transition Temperature, orientation of specimens, steel 12 014.

TOMKOVÁ, Renáta *Posouzení vlivu orientace zkušebního tělesa na tranzitní teplotu T_{SP} určenou pomocí protlačovacích zkoušek na miniaturních discích*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství, 2017. 45 s. Vedoucí práce Ing. Libor Válka , CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Posouzení vlivu orientace zkušebního tělesa na tranzitní teplotu T_{SP} určenou pomocí protlačovacích zkoušek na miniaturních discích“ jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

Poděkování

Touto cestou bych chtěla poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Liboru Válkovi, CSc. za ochotu, věcné připomínky a odborný dohled, který mi v průběhu práce poskytoval. Dále bych chtěla poděkovat paní Ing. Petře Krajňákové, Ph.D. za cenné rady a pomoc při přípravě metalografických vzorků.

Bc. Renáta Tomková

OBSAH

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Úvod | 1 |
| 2 | Cíle práce | 3 |
| 3 | Penetrační zkoušky na miniaturních discích | 5 |
| 3.1 | Princip penetrační zkoušky | 5 |
| 3.2 | Zkušební tělesa | 7 |
| 3.3 | Stanovení mechanických vlastností | 8 |
| 3.3.1 | Stanovení meze kluzu | 9 |
| 3.3.2 | Stanovení meze pevnosti | 11 |
| 4 | Tranzitní lomové chování | 12 |
| 4.1 | Hodnocení tranzitního lomového chování na základě penetračních zkoušek | 12 |
| 4.2 | Hodnocení tranzitního lomového chování na základě zkoušek rázem v ohybu | 15 |
| 4.3 | Korelace tranzitních teplot T_{SP} a $T_{50\%}$ | 16 |
| 5 | Experimentální část | 20 |
| 5.1 | Chemické složení | 21 |
| 5.2 | Mikrostruktura | 21 |
| 5.3 | Tvrдость | 24 |
| 5.4 | Zkouška tahem | 24 |
| 5.5 | Zkouška rázem v ohybu | 27 |
| 5.6 | Penetrační zkouška | 31 |
| 5.7 | Korelace penetrační zkoušky se zkouškou rázem v ohybu | 33 |
| 6 | Diskuze | 35 |
| 7 | Závěr | 37 |
| | Literatura | 38 |
| | Seznam symbolů, veličin a zkratk | 42 |

1 ÚVOD

Testování metodou penetračních zkoušek na miniaturních discích (SPT, Small Punch Test) bylo rozvíjeno začátkem 80. let minulého století v USA (Manahan a spol. [1]) a Japonsku (Huang a spol. [2]). Omezená velikost testovaných komponent [3] a požadavek nedestruktivního testování [4] byly hlavními podněty pro vývoj nestandardní zkušební techniky, jejíž podstatou je zatěžování miniaturních zkušebních těles.

Mezi prvními byly testovány materiály tlakových nádob reaktorů za účelem určení degradace ozářeného materiálu bez dopadu na chod a funkci komponenty [5]. Penetračními zkouškami byla hodnocena rovněž degradace materiálu vlivem teplotního stárnutí strojních součástí pracujících v creepové oblasti [6]. Aplikace této metody byla rozšířena na svarové spoje, funkčně gradientní materiály, kompozitní vrstvy nebo povlaky, kde není možný odběr zkušebních těles standardních rozměrů [7].

Předmětem zájmu mnoha výzkumných pracovišť je v současné době analýza vztahů mezi mechanickými charakteristikami získanými penetračními zkouškami a zkouškami standardními. Jedná se tak např. o hledání závislostí pro výpočet meze kluzu a meze pevnosti z výsledků penetračních zkoušek [8], určování lomové houževnatosti materiálů [9], hodnocení creepového chování [10] apod.

Jednou z oblastí, ve kterých je vyvíjeno úsilí s cílem porozumět vztahům mezi výsledky penetračních zkoušek na miniaturních discích a standardních zkoušek je problematika hodnocení tranzitního lomového chování na základě penetračních testů, viz např. [11, 12].

Byly navrženy lineární vztahy mezi tranzitní teplotou, definovanou pro penetrační testy a tranzitními teplotami, definovanými na základě výsledků zkoušek rázem v ohybu, a to pro oceli s různým chemickým složením a strukturou, např. 100% feritickou uhlík-manganovou ocel, baintickou ocel CrMoV nebo martenzitickou ocel NiCrMo. Ve všech případech byly mezi tranzitními teplotami, určenými z penetračních zkoušek a standardních zkoušek, prokázány lineární závislosti. Bylo zjištěno, že koeficienty vyskytující se v korelačních vztazích úzce souvisí s typem testovaného materiálu [13] a mohou být ovlivněny také orientací zrna v tvářeném polotovaru [14].

Metodika a postupy zahrnující určování mechanických vlastností z výsledků penetračních testů miniaturních zkušebních těles není doposud normalizována. Vyhodnocování zkoušek a analýzy výsledků se řídí doporučeními, vydanými Evropským výborem pro standardizaci [15].

2 CÍLE PRÁCE

Cílem diplomové práce je posoudit, zda je tranzitní teplota T_{SP} , užívaná pro popis tranzitního lomového chování na základě výsledků protlačovacích zkoušek na miniaturních discích ovlivněna orientací zkušebních těles vůči směru tváření polotovaru, ze kterého byla odebrána či nikoliv. Náplní práce je také porovnat míru ovlivnění této charakteristiky s vlivem orientace zkušebních těles na standardní zkoušku rázem v ohybu, která se pro hodnocení tranzitního lomového chování používá rovněž a anizotropií materiálu je ovlivněna velmi významně.

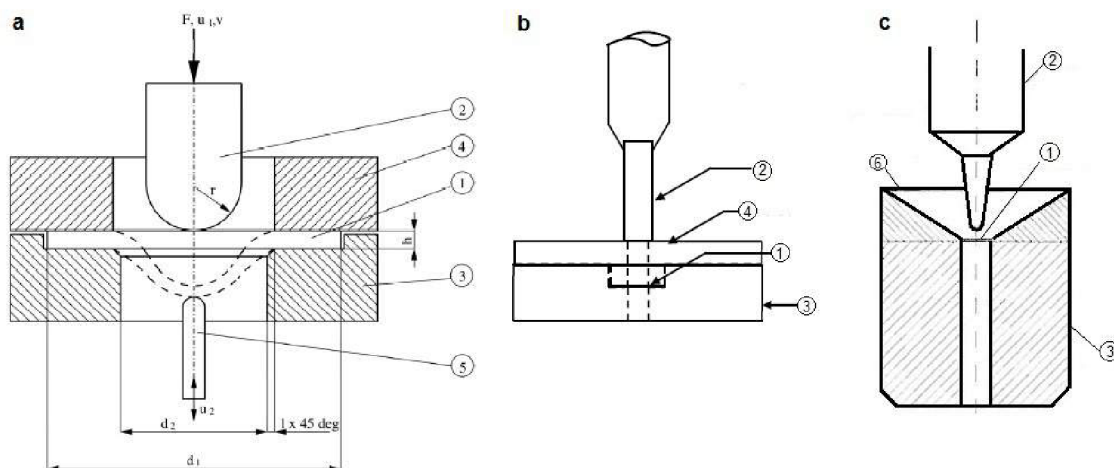
S ohledem na výše uvedené cíle je experimentální část práce založena na provedení sérií zkoušek rázem v ohybu na standardních zkušebních tělesech a protlačovacích zkoušek na miniaturních discích, v obou případech s různou orientací zkušebních těles vůči směru tváření polotovaru, ze kterého byla vyrobena. Po vyhodnocení a analýze teplotních závislostí výsledků zkoušek bude posouzen vliv anizotropie materiálu na tranzitní teplotu T_{SP} .

3 PENETRAČNÍ ZKOUŠKY NA MINIATURNÍCH DISCÍCH

3.1 Princip penetrační zkoušky

Penetrační zkouška se na miniaturních discích (SPT) provádí pomocí zkušebního zařízení (přípravku), které je schématicky znázorněno na obr. 3.1. Sestává se z razníku, horní přitlačné a dolní opěrné matrice, mezi nimiž je zkušební těleso upevněno, příp. je volně položeno na dolní opěrné matrici. Průběh zkoušky, tj. závislost působící síly na posunutí razníku je zaznamenáván snímačem posunutí. [6]

Podle tvaru razníku a způsobu upnutí zkušebního tělesa lze rozdělit penetrační zkoušky na kuličkovou, stříhovou a ohybovou.



Obr. 3.1: Přípravky pro penetrační zkoušku; a) kuličkový penetrační test [15], b) stříhový penetrační test [6], c) ohybový penetrační test [16]. 1 – zkušební těleso, 2 – razník, 3 – spodní opěrná matrice, 4 – horní přitlačná matrice, 5 – snímač průhybu, 6 – středící podložka.

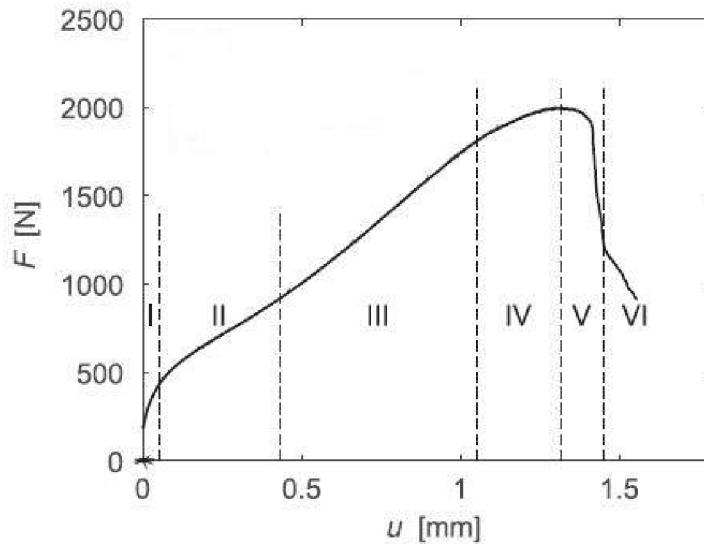
Při *kuličkovém penetračním testu* je razníkem kulička (resp. kulová plocha) (obr. 3.1a) vyrobená z keramického materiálu, např. korundu (Al_2O_3) nebo karbidu wolframu (WC). Zkušební těleso je sevřeno mezi horní a dolní opěrnou matricí.

Pro *stříhový penetrační test* se používá ostrohranný kulatý razník, viz obr. 3.1b. Tento způsob testování je vhodný pro stanovení meze kluzu a meze pevnosti materiálu [6].

U *ohybového penetračního testu* je zkušební těleso volně položeno na spodní matrici a zkušební těleso je protlačováno kuželovitým razníkem (obr. 3.1c).

Vlastní zkouška probíhá při konstantní rychlosti zatěžování, v průběhu zkoušky je zaznamenávána závislost zátěžné síly F na průhybu (posunutí razníku) u . Typická zátěžná křivka, získaná při kuličkovém penetračním testu, je uvedena na obr. 3.2.

Na zátěžné křivce lze identifikovat několik charakteristických oblastí [6].



Obr. 3.2: Závislost působící síly na posunutí razníku [17].

V **oblasti I** dochází k indentaci a elastickému ohybu [11]. V místě pod razníkem vznikají mikro-plastické deformace vlivem vysokého počátečního kontaktního napětí [6].

Pro **oblast II** je charakteristický plastický ohyb. V okamžiku, kdy napětí přesáhne mez kluzu, dochází k plastické deformaci a odklonu od linearit [3]. Zvýšené zatížení je důsledkem zpevňování materiálu a zvětšením kontaktní plochy mezi razníkem a povrchem vzorku. Tato oblast končí inflexním bodem [4], který tvoří hranici mezi oblastí elasto-plastickou a oblastí, kde dominuje membránový efekt. Tvar křivky v oblastech I a II je určen elastickým modulem, mezí kluzu a koeficientem zpevnění materiálu [11].

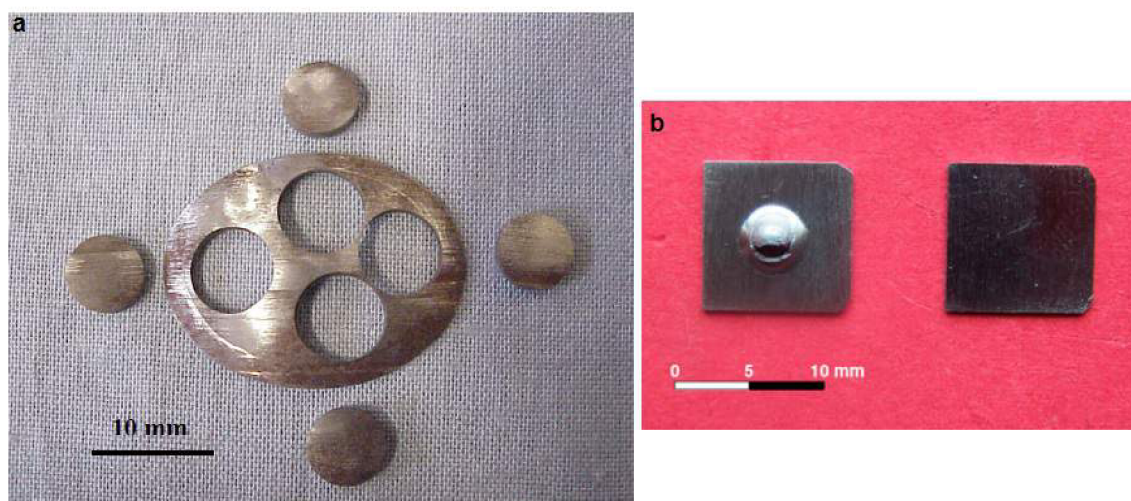
V **oblasti III** dominuje membránový efekt. Zatímco v druhé oblasti převažuje deformace ve směru podélném i příčném, třetí oblast má povahu středové deformace [3]. Rozsah oblasti III je závislý na teplotě zkoušky. S poklesem teploty dochází k zužování uvedené oblasti, k iniciaci trhliny, příp. finálnímu lomu již při menších hodnotách deformace (posunutí razníku). Při dostatečně nízké teplotě může finální lom nastat ve druhé oblasti zátěžné křivky, tj. ještě před začátkem membránové deformace [11].

V **oblasti IV** dochází k výrazné redukci tloušťky zkušební tělesa (vzniku krčku) a k iniciaci trhliny [17]. Oblast je ukončena maximem na zátěžné křivce, jehož hodnota závisí především na koeficientu tření mezi razníkem a zkušebním tělesem [11]. Čím vyšší je koeficient tření, tím vyšší je zatížení a místo lomu se posouvá dále od středu důlku, který vzniká penetrací. S rostoucí teplotou hodnota koeficientu tření klesá.

Oblasti V a VI zátěžné křivky lze považovat za oblasti, ve kterých dochází k šíření trhliny a dolomení zkušební tělesa [17].

3.2 Zkušební tělesa

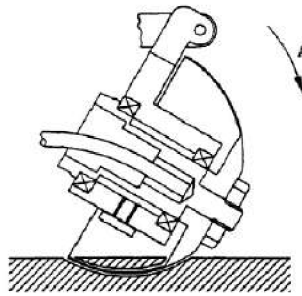
Pro penetrační zkoušku mohou být podle doporučení CEN [15] použita zkušební tělesa tvaru disku o průměru 8 mm nebo tvaru čtverce o délce strany 10 mm, obr. 3.3. Doporučená tloušťka těles je 0,2 mm až 0,6 mm.



Obr. 3.3: Zkušební tělesa pro penetrační zkoušku a) tvaru disku [15], b) tvaru čtverce [4].

Materiál pro výrobu zkušebních těles je možné odebírat např. mechanickým odbrušováním. Řezný nástroj (obr. 3.4) má tvar duté polokoule, jejíž rotací dochází k odběru materiálu. Povrch nástroje je zpravidla pokryt vrstvou kubického nitridu bóru [18]. Proces odběru materiálu uvedenou metodou je časově poměrně náročný, celková doba odběru závisí na druhu odebíraného materiálu, hloubce odběru, existenci chlazení v průběhu odběru apod..

Další metodou odběru materiálu pro výrobu zkušebních těles je princip elektrojiskrového řezání [6], který spočívá v selektivním odtavení malých částic materiálu. Výhodou této metody je nízká cena a snadná manipulace s přístrojem.



Obr. 3.4: Schéma odběru vzorku materiálu. [18]

3.3 Stanovení mechanických vlastností

Odběr materiálu pro výrobu standardních zkušebních těles z konstrukcí a zařízení, např. z důvodu určení jeho mechanických vlastností po provozní degradaci, lze zpravidla označit za destruktivní odběr, spojený s omezením funkčnosti dané konstrukce a potřebou případné následné opravy. Naproti tomu množství odebíraného materiálu pro zkušební tělesa penetračních zkoušek je velmi malé a odběr lze považovat za nedestruktivní. Nedochází obvykle k omezení provozuschopnosti a případné opravy jsou svým rozsahem oproti výše popsané situaci zanedbatelné.

Stanovení mechanických charakteristik materiálu z výsledků penetračních zkoušek je v současné době do značné míry založeno na korelování výsledků penetračních zkoušek s výsledky zkoušek standardních. Ukazuje se, že takto získané korelační vztahy nelze považovat za vztahy obecně platné pro všechny typy materiálů [6,11,13]. Parametry v korelačních rovnicích jsou závislé na druhu materiálu a platné jen pro skupiny typově příbuzných (podobných) kovů a slitin.

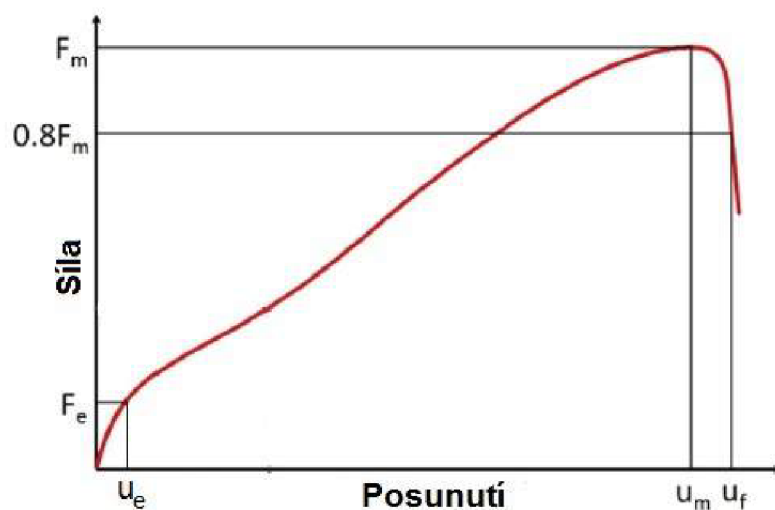
Aplikace korelačních vztahů mezi standardními a penetračními testy vyžaduje vyhodnotit charakteristické veličiny ze záznamů příslušných zátěžných křivek.

V případě penetračních testů lze ze závislosti síla–posunutí razníku (obr. 3.5) určit následující veličiny [6]:

F_m [N] – maximální síla, které je dosaženo v průběhu penetrační zkoušky. Je jednoznačně dána globálním maximem křivky síla–posunutí razníku. [6]

F_e [N] – síla, která určuje přechod mezi oblastí I a II. Jedná se o maximální zatížení, které odpovídá elastické oblasti. Při vyšším zatížení dochází k plastické deformaci. Existují různé metody pro určení tohoto bodu ze závislosti síla–posunutí razníku. [4, 6, 11]

u_e [mm] – posunutí razníku na hranici oblasti I a II.



Obr. 3.5: Závislost působící síly na posunutí razníku [19].

u_m [mm] – posunutí razníku v místě maximální zátěžné síly.

u_f [mm] – posunutí razníku v místě porušení zkušebního tělesa.

Výše uvedené veličiny jsou ovlivněny řadou faktorů, mezi něž patří např. poloměr razníku, průměr otvoru spodní opěrné matrice, počáteční tloušťka zkušebního tělesa apod. [6].

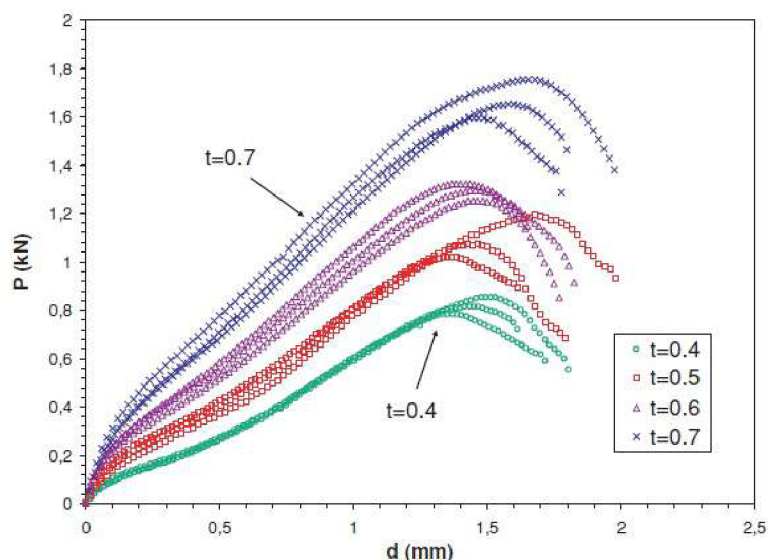
Vliv počáteční *tloušťky zkušebního tělesa* [4] na průběh penetrační zkoušky je patrný z grafů na obr. 3.6, ze kterých je zřejmé, že s rostoucí tloušťkou zkušebních těles hodnoty mechanických vlastností rostou.

3.3.1 Stanovení meze kluzu

Mez kluzu lze stanovit pomocí síly F_e , která odpovídá posunutí razníku u_e [17]. Pro určení F_e bylo různými autory navrženo několik metod.

Metody určení F_e

Hodnotu síly F_e pro určení meze kluzu materiálu lze určit různými způsoby, viz obr. 3.7. Mao a Takahashi [20] definují mez kluzu jako průsečík tečny elastické oblasti s tečnou plastické oblasti (F_{e_Mao}). Toto kritérium je upraveno v technické dohodě CEN CWA 15627 [15], kde je takto získaný průsečík vertikálně promítnut na křivku závislosti síla–posunutí (F_{e_CEN}). Další autoři definují mez kluzu smluvně, viz např. [21, 22]. Jedná se o vytvoření rovnoběžky s lineární oblastí křivky. Tato rovnoběžka je v grafu umístěna s posunutím $t/10$ nebo $t/100$, kde t je počáteční tloušťka zkušebního tělesa. Výslednému průsečíku pak odpovídají hodnoty sil $F_{e_t/10}$,



Obr. 3.6: Závislost zatížení na posunutí razníku pro různé počáteční tloušťky zkušebních těles [4].

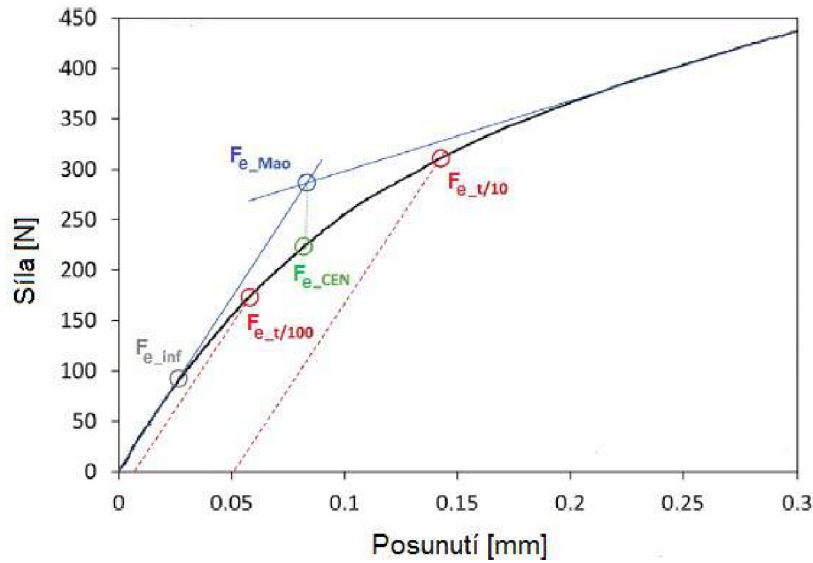
případně $F_{e,t/100}$. Nejaktuálnější návrh na určení meze kluzu udává F_e jako zatížení, které působí v prvním odklonu křivky v oblasti I ($F_{e,inf}$) [5].

Pro stanovení meze kluzu R_e lze použít např. vztah

$$R_e = \alpha_1 \frac{F_e}{t_0^2} + \alpha_2, \quad (3.1)$$

kde t_0 je počáteční tloušťka zkušebního tělesa a α_1 , α_2 jsou konstanty závislé na typu materiálu, poloměru razníku a poloměru otvoru spodní opěrné matrice. [5, 11, 17]

Bylo prokázáno, viz např. [5], že volba metody vyhodnocení síly F_e ovlivňuje hodnoty koeficientů v rov. 3.1, zejména hodnotu parametru α_1 . Pokud je úroveň síly odpovídající mezi kluzu vyhodnocena metodou $F_{e,Mac}$ (resp. $F_{e,CEN}$), jsou hodnoty meze kluzu získané přepočtem velmi přesné, ovšem platné jen pro relativně malou skupinu podobných typů materiálů. Pokud do výpočtu vstupuje síla $F_{e,t/10}$, korelace je méně přesná, ovšem odhad meze kluzu je platný pro širší spektrum materiálů.



Obr. 3.7: Metody určení meze kluzu [5].

3.3.2 Stanovení meze pevnosti

Pro výpočet meze pevnosti R_m využíváme hodnotu F_m , která je dána globálním maximem křivky síla–posunutí razníku.

Pro stanovení R_m jsou používány vztahy [5, 17]

$$R_m = \beta_1 \frac{F_m}{t_0 u_m} + \beta_2, \quad (3.2)$$

resp.

$$R_m = \beta'_1 \frac{F_m}{t_0^2} + \beta'_2, \quad (3.3)$$

kde β_1 , β_2 , β'_1 a β'_2 , jsou parametry závislé na geometrii razníku, příp. poloměru otvoru opěrné matrice.

Preferovaným je vztah 3.2, protože síla F_m je stanovena v oblasti, kde dochází k membránovému protahování a zužování zkušební tělesa a lze tedy očekávat, že síla bude lineárně závislá na tloušťce zkušební tělesa [17].

4 TRANZITNÍ LOMOVÉ CHOVÁNÍ

4.1 Hodnocení tranzitního lomového chování na základě penetračních zkoušek

Bylo prokázáno [23,24], že pokud ocel vykazuje tranzitní chování při zkoušce rázem v ohybu (viz kap. 4.2), lze pozorovat tranzitní chování i u penetrační zkoušky. Tranzitní teplotu T_{SP} přechodu tvárný–štěpný lom (*DBTT*, Ductile-Brittle Transition Temperature) lze stanovit z teplotní závislosti lomové energie E_f , určené ze závislosti síla F –posunutí razníku u . Tranzitní teplota T_{SP} je podle CWA 15627 [15] definována jako teplota, odpovídající polovině součtu minimální a maximální energie v závislosti E_f – T . Lomová energie je dána určitým integrálem pro výpočet obsahu plochy pod křivkou síla–posunutí razníku

$$E_f = \int_0^{u_f} F(u) du. \quad (4.1)$$

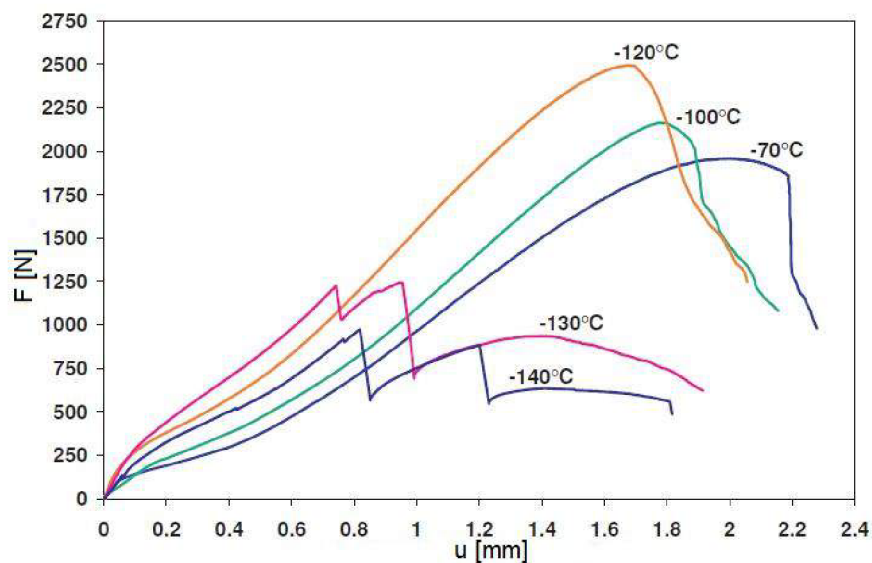
Horní mez integrálu je dána posunutím razníku v okamžiku lomu u_f , přičemž okamžik lomu je definován různými autory odlišně. Některé publikace [19,25] uvádějí, že u_f odpovídá hodnotě u_m , častěji je u_f považováno za velikost posunutí razníku pro okamžik, kdy síla klesne na 80 % své maximální hodnoty ($F_f = 0,8F_m$), viz obr. 3.5 [17].

Popsaná situace je snadno interpretovatelná v případě tvárného (houževnatého) lomu, kdy zátěžná křivka F – u je hladká. U štěpného lomu je třeba se zaměřit na náhlé poklesy síly, které se mohou objevit ještě před dosažením globálního maxima v závislosti F – u (obr. 4.1). Pro tyto případy byly navrženy další definice stanovení u_f [17], např. kritérium prvního poklesu síly, kdy se u_f odečítá v místě, kde dojde k prvnímu poklesu síly, příp. jsou poklesy síly postupně sečítány až do okamžiku, kdy jejich součet dosáhne 20 % maximální hodnoty síly F_m .

Za pozornost stojí také skutečnost, že v případě houževnatých materiálů s klesající teplotou roste velikost síly, která je potřebná pro dosažení určité velikosti deformace. V případě křehkých materiálů je situace opačná, stejná deformační odezva je při poklesu teploty vyvolána při působení nižší síly [11], obr. 4.1.

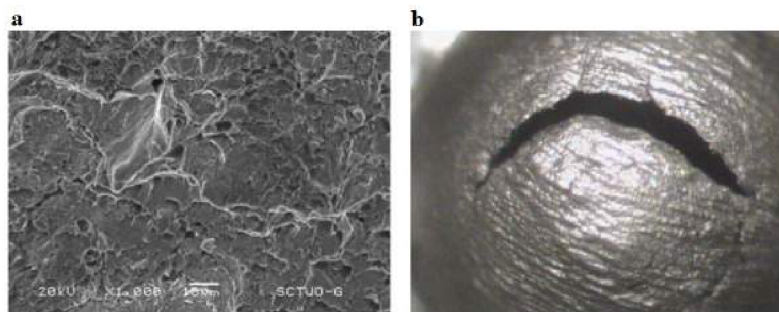
Projevem tranzitního lomového chování je změna mechanismu porušování materiálu. Dle makroskopického vzhladu lomové plochy, resp. polohy a tvaru trhliny lze u penetrační zkoušky určit, zda se jedná o tvárný, příp. štěpný lom.

Tvárný lom je charakteristický vznikem mikro dutin, které lze pozorovat na lomové ploše, viz obr. 4.2a. Tento typ lomu je v případě penetračních zkoušek doprovázen charakteristickým průběhem lomové čáry, kdy se trhlina šíří po obvodu



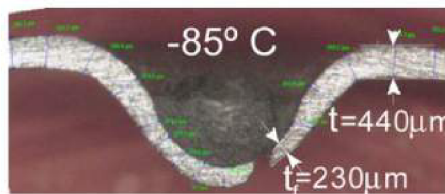
Obr. 4.1: Srovnání tranzitních křivek křehkého a houževnatého chování materiálu při penetrační zkoušce. [11]

vrchlíku silně zdeformovaného (vybouleného) disku (obr. 4.2b). Dochází k odseparování části disku ve tvaru „kloboučku“.



Obr. 4.2: Tvárný lom; (a) dutiny na lomové ploše, (b) obvodová trhлина [11].

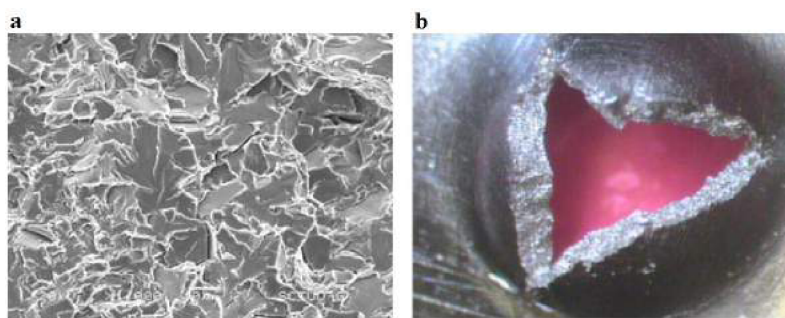
Značnou plastickou deformaci v případě lomu tvárným mechanismem, tj. materiálu v houževnatém stavu, lze dokumentovat např. výraznou změnou (zmenšením) tloušťky zkušebního tělesa v místě lomu, obr. 4.3.



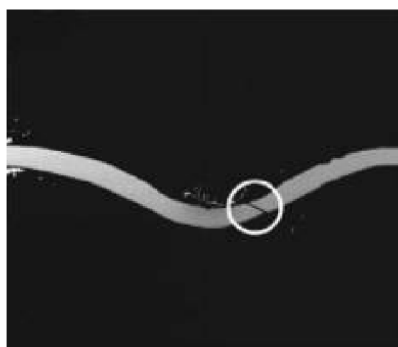
Obr. 4.3: Tvárný lom, výrazné zmenšení tloušťky disku v místě lomu [11].

Štěpný lom je charakterizován vznikem štěpných fazet na lomové ploše (obr. 4.4a). Z makroskopického pohledu je lom tvořen třemi trhlinami, uspořádanými do tvaru hvězdy (obr.4.4b). Jedná se o náhlý, nestabilní lom, v oblasti pod razníkem dochází pouze k nepatrnému zplastizování materiálu [11].

Dokladem nepatrné velikosti plastické deformace v případě štěpného dolomení zkušebního tělesa může být malá změna tloušťky disku v místě lomu, obr. 4.5.



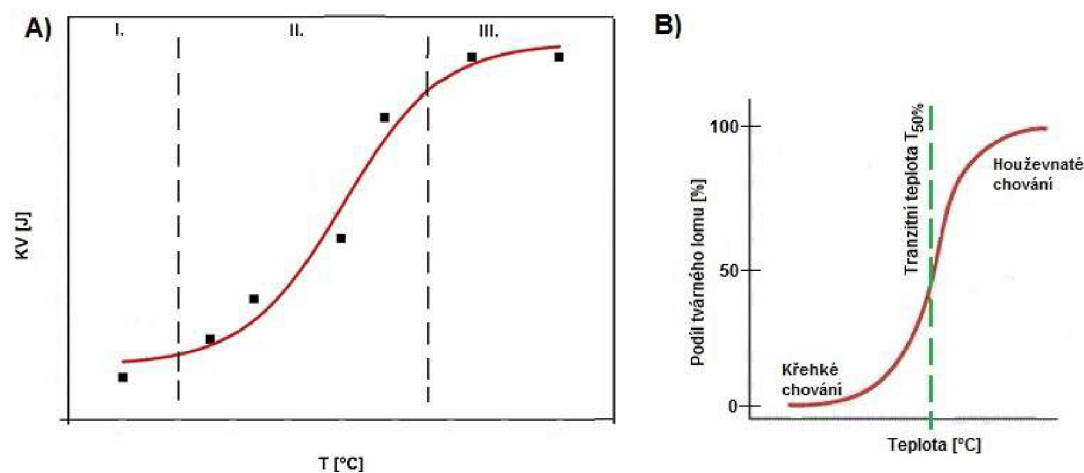
Obr. 4.4: Štěpný lom; (a) štěpné fazety na lomové ploše, (b) radiální trhliny. [11]



Obr. 4.5: Štěpný lom, nevýrazná plastická deformace v místě lomu. [26]

4.2 Hodnocení tranzitního lomového chování na základě zkoušek rázem v ohybu

Zkouška rázem v ohybu (ZRO) patří do kategorie dynamických zkoušek [27]. Působením kyvadla rázového kladiva dochází k porušení zkušebního tělesa opatřeného vrubem. Měřenou veličinou v případě standardní zkoušky rázem v ohybu je energie spotřebovaná na porušení zkušebního tělesa, tzn. nárazová práce KV [J].



Obr. 4.6: A) teplotní závislost nárazové práce, I. – dolní prahová oblast, II. – tranzitní oblast, III. – horní prahová oblast [28], B) teplotní závislost podílu tvárného lomu [29].

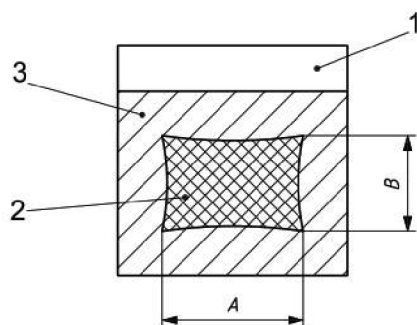
U běžně používaných konstrukčních materiálů s prostorově centrovanou kubickou mřížkou (BCC) dochází k výrazné závislosti nárazové práce na teplotě. Schematicky je typická závislost nárazové práce KV na teplotě T uvedena na obr. 4.6. Tvar křivky je ovlivněn materiálem, geometrií zkušebního tělesa a rychlostí zatěžování [27]. Vliv na tvar tranzitní křivky má rovněž orientace zkušebního tělesa (vrubu) vůči směru tváření materiálu polotovaru, ze kterého jsou zkušební tělesa odebírána.

V tranzitní oblasti dochází s poklesem teploty ke snížení hodnot nárazové práce. Šířka teplotního intervalu, ve kterém k poklesu dochází je závislá na typu materiálu, stejně tak i její umístění na teplotní ose. Typem materiálu, příp. dalšími výše zmíněnými činiteli, je rovněž ovlivněn rozdíl mezi maximálními a minimálními hodnotami nárazové práce.

Parametry vyhodnocovanými po zkoušce mohou být např. vzhled lomové plochy (podíl tvárného/štěpného lomu na lomové ploše) a velikost příčného rozšíření [27], které charakterizuje plasticitu materiálu.

Z teplotních závislostí nárazové práce a výše uvedených parametrů jsou určovány

tzv. tranzitní teploty. Patří mezi ně např. teplota T_{27J} , která odpovídá hodnotě velikosti nárazové práce $KV = 27J$ nebo teplota $T_{50\%}$ (*FATT*, Fracture Appearance Transition Temperature), určovaná pomocí teplotní závislosti vzhledu lomové plochy a odpovídající podílu 50 % tvárného lomu na lomové ploše, viz obr. 4.7.



Obr. 4.7: Schéma lomové plochy. 1 – vrub, 2 – oblast štěpného lomu, 3 – oblast tvárného lomu. [27]

4.3 Korelace tranzitních teplot T_{SP} a $T_{50\%}$

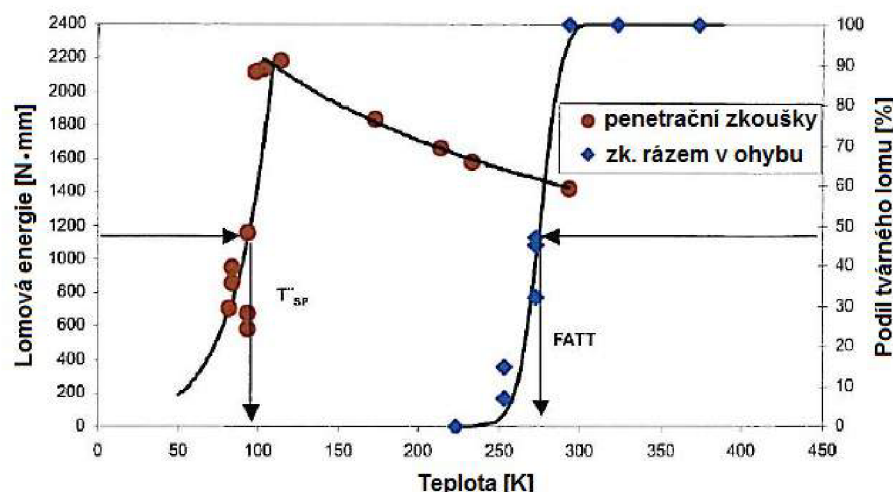
Tranzitní teplota T_{SP} je často korelována s tranzitními teplotami definovanými z teplotních závislostí veličin, které jsou dány zkouškou rázem v ohybu, zejména s teplotou $T_{50\%}$ [27].

Průběh tranzitních křivek získaných z penetračních zkoušek a zkoušek rázem v ohybu je odlišný, jak je patrné z obr. 4.8. Při určování tranzitní teploty $T_{50\%}$ při zkoušce rázem v ohybu se vychází ze závislosti podílu tvárného lomu na teplotě. Při penetrační zkoušce se tranzitní teplota T_{SP} odečítá ze závislosti lomové energie na teplotě.

Z křivek na obr. 4.8 plyne, že tranzitní oblast u penetračních zkoušek na miniaturních discích leží v oblasti nižších teplot než u zkoušky rázem v ohybu.

Příčinu rozdílů v polohách tranzitních oblastí na teplotní ose při penetračních testech a zkouškách rázem v ohybu lze spatřovat zejména v dynamice zkoušek (statické vs. dynamické zatěžování), přítomnosti koncentrátoru napětí (hladké vs. vrubované zkušební těleso) a v objemu zatěžovaného materiálu („malé“ vs. „velké“ zkušební těleso).

Korelace mezi teplotou $T_{50\%}$ a tranzitní teplotou určenou penetrační zkouškou T_{SP} je možné vyjádřit např. rovnicí [11]



Obr. 4.8: Srovnání tranzitních křivek při zkoušce rázem v ohybu a penetrační zkoušce. [6]

$$T_{SP} = \alpha \cdot T_{50\%}, \quad (4.2)$$

kde α je materiálová konstanta.

Další používaný vztah pro korelaci teplot $T_{50\%}$ a T_{SP} lze zapsat ve formě [14, 17]

$$T_{SP} = \alpha' \cdot T_{50\%} + \beta', \quad (4.3)$$

kde α' , β' jsou materiálové konstanty. V rov. 4.3 stejně jako v rov. 4.2 jsou teploty uvedeny v Kelvinech [K].

Vliv anizotropie struktury materiálu na výsledky zkoušky rázem v ohybu je obecně známý a očekávaný. Podle [14] byl v některých pracích stejný vliv prokázán i v případě penetračních zkoušek, což mimo jiné znamená, že mění se orientace zkušebních těles pro ZRO a SPT může ovlivnit (empirický) vztah mezi teplotami $T_{50\%}$ a T_{SP} .

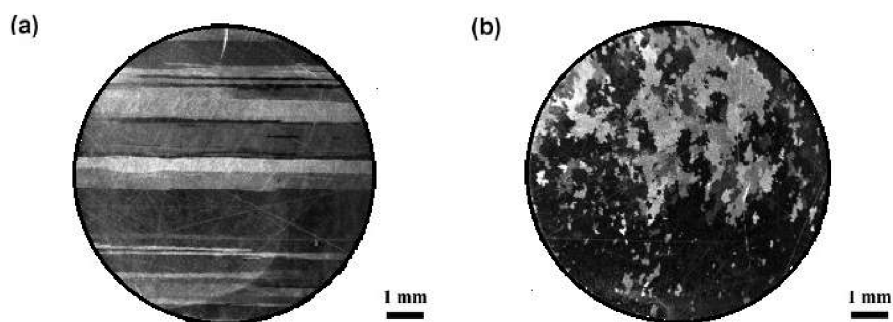
Orientace vrubu ve směru rovnoběžném se směrem protažení zrn materiálu (směr axiální) je při ZRO obvykle doprovázen vyššími hodnotami nárazové práce a nižšími tranzitními teplotami, než je tomu v případě, kdy vrub je orientován kolmo na směr tváření. Tato teorie byla aplikována na zkušební tělesa pro penetrační zkoušky a v mnoha případech (viz práce [14, 30–33]) byl zaznamenán rozdílný průběh penetračních zkoušek v souvislosti s různou orientací zrn v materiálu.

Vliv orientace zrn na tranzitní teplotu T_{SP} při penetračních zkouškách byl zaznamenán např. u feritických ODS ocelí, které mají silně anizotropní mechanické vlastnosti. Na obr. 4.9 je uvedena mikrostruktura zkušebních těles pro penetrační

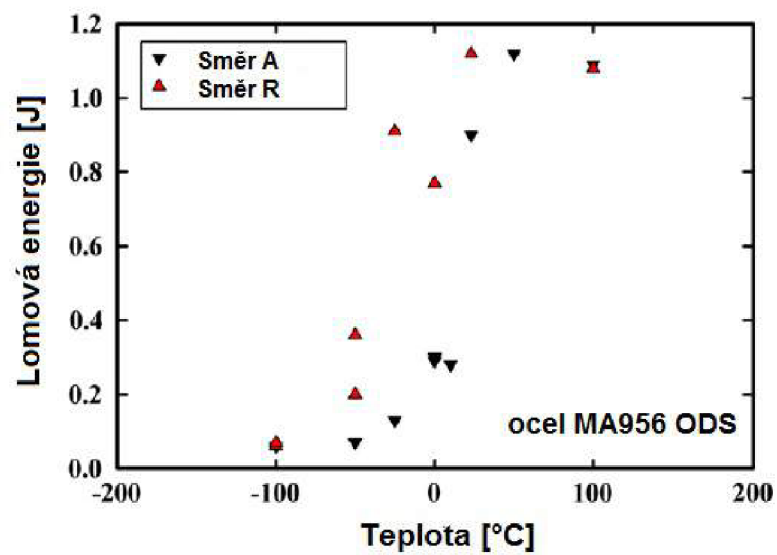
zkoušku odebraných ve směru radiálním (obr. 4.9a) a axiálním (obr. 4.9b).

U feritických ODS ocelí bylo zjištěno [31, 33], že tranzitní teplota T_{SP} je nižší pro zkušební tělesa orientovaná axiálně, viz obr. 4.10. Odlišné hodnoty tranzitních teplot ODS oceli se projevily díky silné anizotropii zrn materiálu (obr. 4.9), tzn. v případě slabší anizotropie nemusí být T_{SP} orientací zrn ovlivněna.

Anizotropní chování feritických ODS ocelí při penetračních zkouškách je s největší pravděpodobností zapříčiněno hrubými křehkými fázemi (karbidy, oxidy) [33], které se nacházejí podél protažených zrn, k iniciaci a šíření trhlin pak dochází ve směru protaženého zrna. V radiálním směru je iniciována dlouhá paralelní trhlina, v axiálním směru dochází ke vzniku kratších trhlin symetrických kolem vytvořené indentace. Anizotropii pozorovanou při lomovém chování za nižších teplot lze interpretovat jako důsledek interkrystalického štěpného lomu, při vyšších teplotách pak interkrystalického tvárného lomu.



Obr. 4.9: Mikrostruktura zkušebních těles pro penetrační zkoušku, a - radiální směr, b - axiální směr. [31]



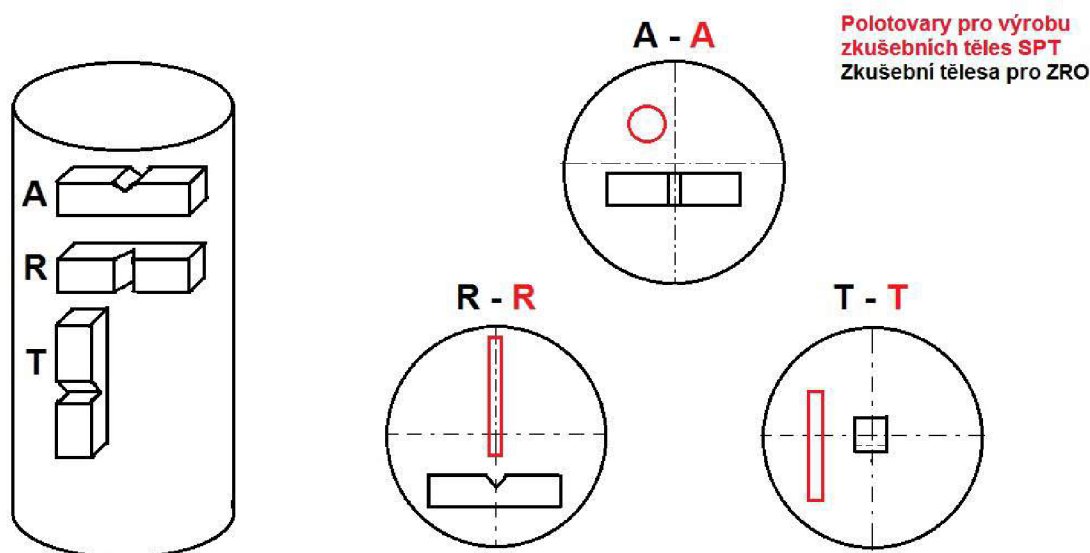
Obr. 4.10: Teplotní závislost lomové energie, směr A - axiální, směr R - radiální. [31]

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Jako experimentální materiál byla použita ocel ČSN 41 2014, resp její přesný ekvivalent ocel RFe80, W.Nr. 1.1014. Jedná se o uhlíkovou, magneticky měkkou ocel, používanou kvůli svým specifickým magnetickým a elektrickým vlastnostem zejména v oborech zaměřených na elektroniku, elektrotechniku a telekomunikace.

Ocel 12 014 byla zvolena kvůli očekávané výhodné poloze tranzitní křivky na teplotní ose, tj. tranzitním teplotám v oblasti vyšších teplot.

Jako polotovary pro výrobu zkušebních těles byla použita válcová tyč o průměru 80 mm a délce 1000 mm dodaná v tepelně nezpracovaném stavu. Orientace zkušebních těles pro zkoušku rázem v ohybu (ZRO) a penetrační zkoušku (SPT) vůči polotovaru a směru jeho tváření je patrná ze schématu na obr. 5.1.



Obr. 5.1: A – axiální směr, R – radiální směr, T – tangenciální směr.

V tabulce 5.1 je dáno do souvislosti označení metalografických výbrusů s označením zkušebních těles pro ZRO a SPT.

Tab. 5.1: Označení zkušebních těles

| ZRO (obr. 5.1) | SPT (obr. 5.1) | Mikrostruktura (obr. 5.2) | Popis |
|-------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|
| A | A | A | axiální směr |
| R | R | R | radiální směr |
| T | T | T | tangenciální směr |

5.1 Chemické složení

Chemické složení oceli bylo měřeno přístrojem Spectrumat GDS 750. Výsledky analýzy jsou uvedeny v tabulce 5.2.

Chemické složení experimentálního materiálu, ocel RFe80, W.-Nr. 1.104, odpovídá chemickému složení oceli 12 014, viz tab. 5.3. Materiál byl dodán v surovém stavu a dle nízkého obsahu uhlíku se jedná o převážně feritickou ocel.

Tab. 5.2: Chemické složení oceli RFe80, W.-Nr. 1.104

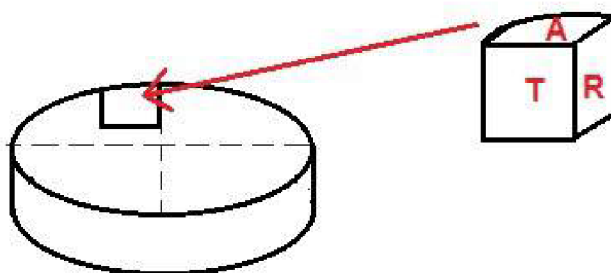
| Prvek | C | Mn | Si | P | S | Cr | Ni | Cu | Al | Co | Sn |
|---------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|------|------|
| [hm. %] | 0,04 | 0,26 | 0,01 | 0,007 | 0,010 | 0,03 | 0,03 | 0,05 | 0,044 | 0,01 | 0,02 |

Tab. 5.3: Chemické složení oceli 12 014 [34]

| Prvek | C | Mn | Si | P | S | Al |
|---------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| [hm. %] | max 0,06 | max 0,45 | max 0,15 | max 0,020 | max 0,020 | min 0,020 |

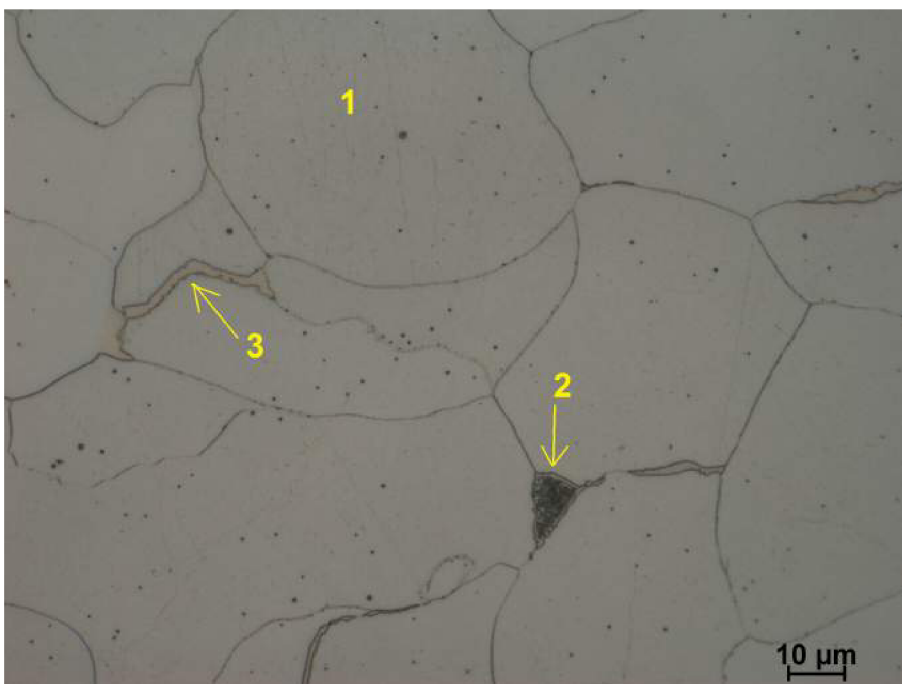
5.2 Mikrostruktura

Analýza mikrostruktury byla provedena ve třech směrech vzhledem k podélné ose polotovaru, tj. ke směru válcování. Schematicky je orientace metalografických vzorků uvedena na obr. 5.2.

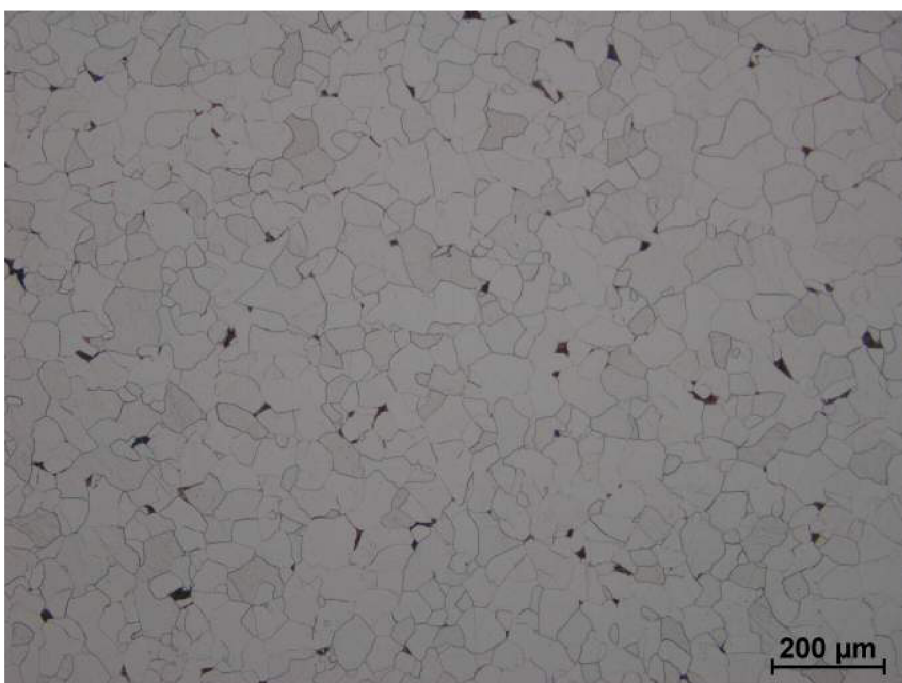


Obr. 5.2: Místa odběru vzorků pro analýzu mikrostruktury.

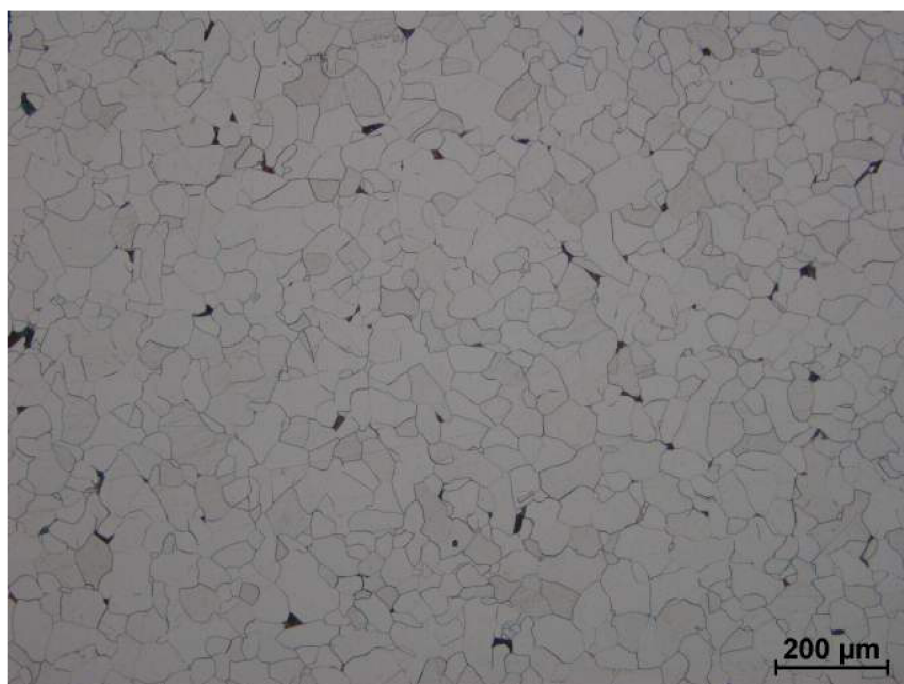
Metalografická analýza ukázala (obr. 5.3), že struktura oceli je tvořena převážně feritem s malým podílem lamelárního perlitu a terciárního cementitu. Fotografie na obr. 5.4 – 5.6 zobrazují mikrostrukturu v jednotlivých směrech. V žádném ze tří směrů nebylo znatelné protažení zrn související s tvářením polotovaru.



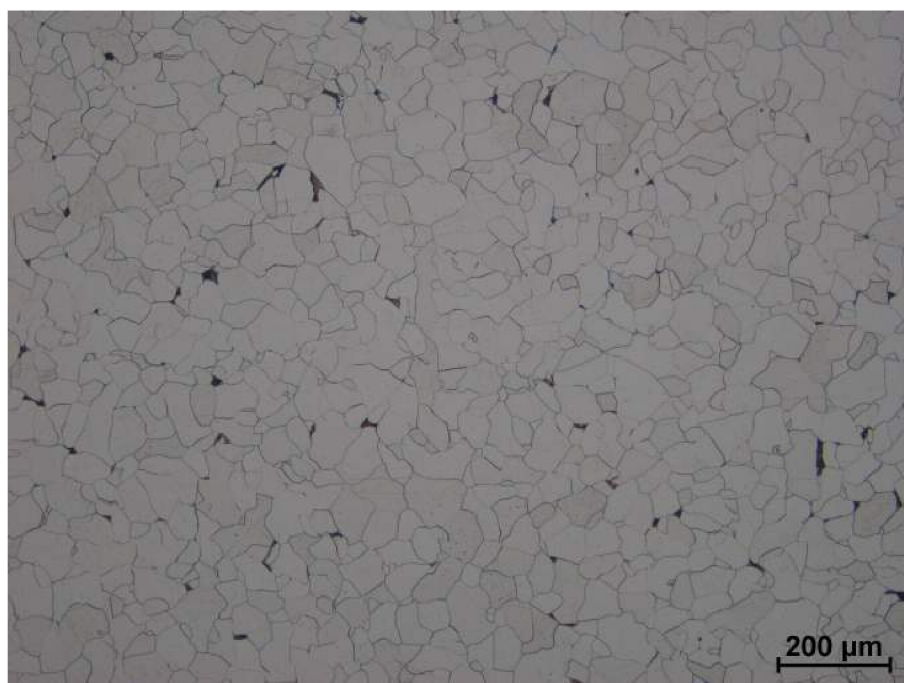
Obr. 5.3: Mikrostruktura oceli 12 014. 1 – ferit, 2 – lamelární perlit, 3 – terciární cementit.



Obr. 5.4: Mikrostruktura oceli 12 014 v axiálním směru.



Obr. 5.5: Mikrostruktura oceli 12 014 v radiálním směru.



Obr. 5.6: Mikrostruktura oceli 12 014 v tangenciálním směru.

Střední velikost feritického zrna

Střední velikosti feritického zrna byla určena lineární průsečíkovou metodou [35] a počítána dle vztahu

$$d_g = \frac{L_T}{\bar{N}}, \quad (5.1)$$

kde L_T je skutečná délka úsečky (poměr délky úsečky na obrázku a celkového zvětšení), \bar{N} je průměrný počet zrn. U každého vzorku bylo zmapováno pět oblastí při celkovém zvětšení 100 a skutečné délce úsečky 150 mm.

Střední velikost feritického zrna d_g a její směrodatná odchylka s pro všechny tři orientace (obr. 5.2) jsou souhrnně uvedeny v tab. 5.4.

Tab. 5.4: Střední velikost feritického zrna

| Orientace | d_g [μm] | s [μm] |
|-----------|-------------------------|-----------------------|
| A | 36,2 | 1,9 |
| T | 36,9 | 1,0 |
| R | 34,1 | 1,9 |

5.3 Tvrdost

Měření tvrdosti bylo provedeno tvrdoměrem Leco LV-700, výsledné hodnoty HV10 jsou uvedeny v tab. 5.5. Tvrdost byla měřena ve třech směrech vůči směru tváření, jejichž označení opět koresponduje s obr. 5.2.

Tab. 5.5: Tvrdost oceli 12 014

| Orientace | Tvrdost HV10 |
|-----------|--------------|
| A | 107,8 |
| T | 102,0 |
| R | 98,9 |

5.4 Zkouška tahem

Mechanické vlastnosti experimentálního materiálu byly určeny zkouškou tahem za pokojové teploty dle ČSN EN ISO 6892-1 [36]. Měření bylo realizováno na univerzálním trhacím stroji Zwick Z250 Allround-line tCII s dynamometrem 150 kN. Prodloužení zkušebních těles bylo snímáno extenzometrem multiXtens, průběh a vyhodnocení zkoušek bylo řízeno softwarem testXpert ver. 3.4. Rychlost zatěžování byla v oblasti

elastických deformací a v okolí meze kluzu 1 mm/min, jinde potom 2 mm/min. Pro experimenty byla použita zkušební tělesa s průměrem měřené části 6 mm a měřenou délkou 30 mm (DIN EN 50 125 [37]).

Testována byla tři zkušební tělesa pro axiální směr a tři tělesa pro směr radiální. Hodnoty mechanických vlastností určené ze zkoušky tahem včetně průměrných hodnot v axiálním směru, resp. v radiálním směru jsou obsahem tab. 5.6, resp. tab. 5.7.

Zatěžovací křivky všech zkušebních těles jsou uvedeny v Příloze A.

Tab. 5.6: Základní mechanické charakteristiky, axiální směr (A)

| Zk. těleso | Teplota [°C] | d_0 [mm] | E [GPa] | R_{eL} [MPa] | R_{eH} [MPa] | R_m [MPa] | A [%] | Z [%] |
|------------|-----------------|---------------|--------------|-------------------|-------------------|----------------|------------|------------|
| A1 | 20 | 6,007 | 162 | 219 | 232 | 325 | 38 | 81 |
| A2 | 20 | 6,010 | 195 | 226 | 241 | 329 | 37 | 80 |
| A3 | 20 | 6,016 | 194 | 238 | 280 | 327 | 40 | 80 |
| \bar{v} | | | 184 | 228 | 251 | 327 | 39 | 80 |
| s | | | 15,3 | 7,8 | 20,8 | 1,6 | 1,2 | 0,5 |

Tab. 5.7: Základní mechanické charakteristiky, radiální směr (R)

| Zk. těleso | Teplota [°C] | d_0 [mm] | E [GPa] | R_{eL} [MPa] | R_{eH} [MPa] | R_m [MPa] | A [%] | Z [%] |
|------------|-----------------|---------------|--------------|-------------------|-------------------|----------------|------------|------------|
| R1 | 20 | 5,999 | 188 | 209 | 246 | 314 | 37 | 78 |
| R2 | 20 | 6,011 | 154 | 179 | 210 | 294 | 33 | 80 |
| R3 | 20 | 6,004 | 178 | 197 | 225 | 313 | 38 | 80 |
| \bar{v} | | | 173 | 195 | 227 | 307 | 36 | 79 |
| s | | | 14,3 | 12,3 | 14,8 | 9,2 | 2,2 | 0,9 |

V tabulkách 5.6 a 5.7 je d_0 počáteční průměr měřené části zkušebního tělesa, E modul pružnosti v tahu, R_{eL} a R_{eH} dolní a horní mez kluzu, R_m mez pevnosti v tahu, A tažnost, Z kontrakce, \bar{v} průměrná hodnota, s směrodatná odchylka.

Mechanické vlastnosti R_e , R_m a A dané zkouškou tahem byly srovnány s hodnotami získanými přepočtem z penetračních zkoušek.

Ze závislosti síla–posunutí razníku byly určeny síly na mezi kluzu (obr. 3.7) a pomocí korelačních vztahů [5]

$$R_{e,CEN} = 0,476 \cdot \frac{F_{e,CEN}}{t_0^2}, \quad (5.2)$$

$$R_{e.t/10} = 0,346 \cdot \frac{F_{e.t/10}}{t_0^2}, \quad (5.3)$$

vypočteny meze kluzu.

V rov. 5.2 a 5.3 je t_0 počáteční tloušťka zkušebního tělesa, $F_{e.CEN}$ síla na mezi kluzu dle CEN a $F_{e.t/10}$ síla na mezi kluzu určená smluvně.

Pro výpočet byly zvoleny korelační vztahy (rov. 5.2, rov. 5.3), které jsou méně závislé na typu materiálu [5], tzn. poskytují dobrý odhad meze kluzu pro relativně širokou škálu slitin. Průměrné hodnoty vypočtených mezí kluzu pro axiální a radiální směr jsou uvedeny v tab. 5.8. Hodnoty mezí kluzu v axiálním směru jsou podle očekávání vyšší než ve směru radiálním.

Tab. 5.8: Srovnání mezí kluzu

| Orientace | Teplota | R_{eL} | $R_{e.CEN}$ | $R_{e.t/10}$ |
|-----------|---------|----------|-------------|--------------|
| | [°C] | [MPa] | [MPa] | [MPa] |
| A | 20 | 228 | 171 | 241 |
| R | 20 | 195 | 171 | 211 |

Z tab. 5.8 plyne, že hodnota $R_{e.t/10}$ získaná přepočtem z penetračních zkoušek dává pro ocel 12 014 přesnější odhad meze kluzu než hodnota $R_{e.CEN}$. U standardní zkoušky se projeví rozdíl v mezi kluzu s ohledem na směr tváření, stejně tak i u korelačních hodnot $R_{e.t/10}$, hodnoty $R_{e.CEN}$ vypočtené ze sil $F_{e.CEN}$ vliv směru tváření nepostihují.

Pro výpočet meze pevnosti z penetračních zkoušek byla odečtena ze závislosti síla–posunutí razníku síla F_m a dosazena do korelačních vztahů [5, 20]

$$R_{m.Mao} = 0,130 \cdot \frac{F_m}{t_0^2} - 320, \quad (5.4)$$

resp.

$$R_{m.Mat} = 0,277 \cdot \frac{F_m}{t_0^2 u_m}, \quad (5.5)$$

kde t_0 je počáteční tloušťka zkušebního tělesa, u_m posunutí v místě maximálního zatížení a F_m maximální síla. V literatuře se uvádí (viz např. [5]), že vztah 5.5 poskytuje lepší odhad hodnoty meze pevnosti než vztah 5.4. Tato skutečnost se v případě oceli 12 014 nepotvrdila, přesnější odhad je dán rov. 5.4. Průměrné hodnoty vypočtených mezí pevnosti jsou uvedeny v tab. 5.9.

Při standardní zkoušce tahem vykazuje materiál podle očekávání v axiálním směru vyšší hodnoty meze pevnosti než ve směru radiálním. Tato skutečnost je v kontrastu s výsledky penetračních testů, kdy meze pevnosti přepočtené z příslušných hodnot sil jsou vyšší ve směru radiálním.

Tab. 5.9: Srovnání mezí pevnosti

| Orientace | Teplota | R_m | R_{m_Mao} | R_{e_Mat} |
|-----------|---------|-------|--------------|--------------|
| | [°C] | [MPa] | [MPa] | [MPa] |
| A | 20 | 327 | 226 | 559 |
| R | 20 | 307 | 329 | 577 |

Pro odhad hodnoty tažnosti byly navrženy korelační vztahy [5]

$$A_{Fle} = 12,57 \cdot u_m, \quad (5.6)$$

příp.

$$A_{Rod} = 6,07 \cdot \frac{u_m}{t_0}, \quad (5.7)$$

kde u_m je posunutí razníku při maximálním zatížení a t_0 je počáteční tloušťka zkušební tělesa. Autoři práce [5] uvádějí, že ani jedna z rovnic nedokáže s dostatečnou přesností odhadnout hodnoty tažnosti A , což bylo potvrzeno i pro ocel 12 014, viz tab. 5.10.

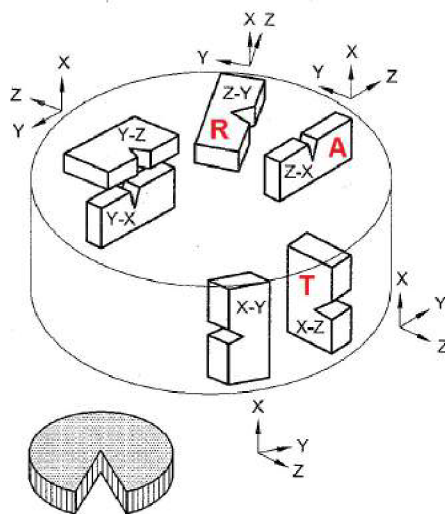
Tab. 5.10: Srovnání hodnot tažnosti

| Orientace | Teplota | A | A_{Fle} | A_{Rod} |
|-----------|---------|------|-----------|-----------|
| | [°C] | [%] | [%] | [%] |
| A | 20 | 38,5 | 21,5 | 20,6 |
| R | 20 | 35,7 | 24,6 | 23,7 |

5.5 Zkouška rázem v ohybu

Zkušebním zařízením pro zkoušku rázem v ohybu bylo kyvadlové kladiivo Hec-kert PSd 300/150 (300 J). Testování probíhalo v intervalu teplot 20 °C až 95 °C. Požadované teploty zkušební tělesa bylo dosaženo ohříváním ve vodní lázni s výdrží na požadované teplotě minimálně 10 min.

Pro zkoušku rázem v ohybu byla použita standardní zkušební tělesa s V-vrubem a rozměry (55 × 10 × 10) mm. Rozměry zkušebních těles i vlastní provedení testů bylo v souladu s ČSN ISO 148-1 [27]. Materiál pro výrobu zkušebních těles byl z výchozího polotovaru (v souladu s normou ČSN EN ISO 3785 [38]) odebrán tak, aby byly získány tři charakteristické orientace vrubu vůči směru tváření polotovaru, viz schema na obr. 5.7 a obr. 5.1.



Obr. 5.7: Označení orientace zkušebních těles vzhledem k polotovaru ve tvaru radiálně tvářené tyče [38].

Při zkoušce rázem v ohybu byla v závislosti na teplotě vyhodnocována nárazová práce (obr. 5.8), podíl tvárného lomu (obr. 5.9) a velikost příčného rozšíření (obr. 5.10). Zmíněné závislosti byly určeny pro všechny tři směry tvářeni.

Experimentální data byla proložena exponenciální funkcí ve tvaru

$$f(x) = \exp(A + BT), \quad (5.8)$$

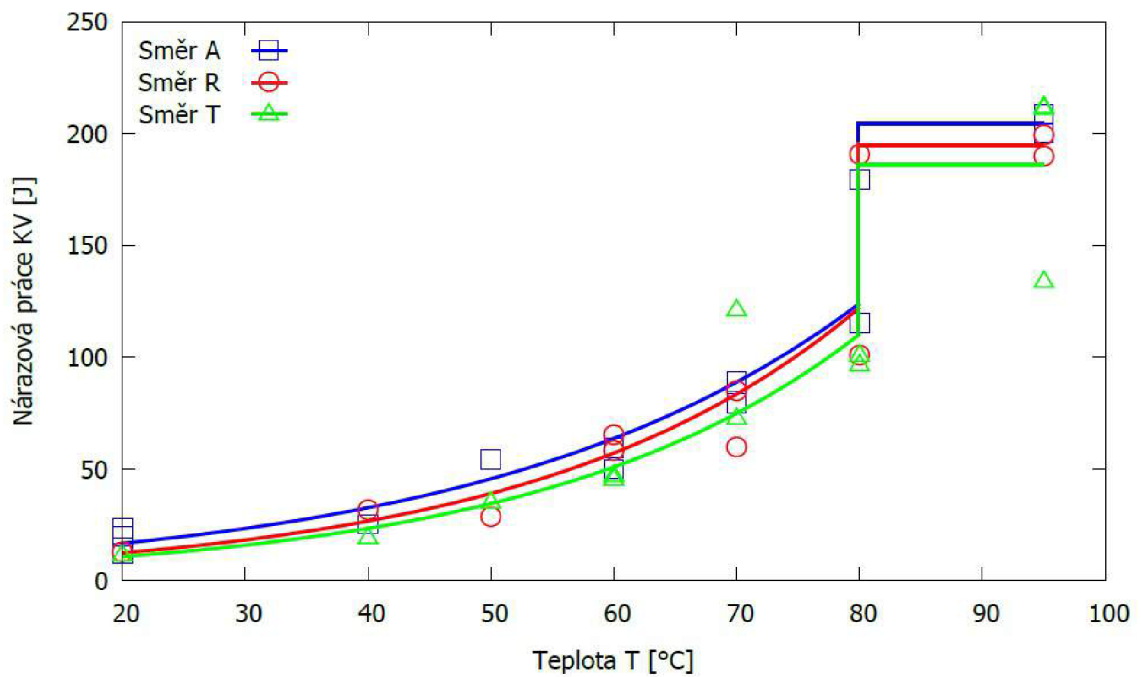
kde A , B jsou regresní parametry křivky a T je teplota v Kelvinech.

Závislost popsaná rov. 5.8 byla aplikována na soubor experimentálních hodnot, zahrnující všechna zkušební tělesa, která nevykazovala čistě tvárný lom, tj. tělesa, splňující podmínku $P_L < 100\%$. Jedná se o tělesa, spadající do spodní prahové, resp. tranzitní oblasti přechodové křivky.

Hodnoty regresních parametrů A , B teplotních závislostí KV , P_L a ΔB jsou pro všechny orientace vrubu spolu s koeficienty korelace R a směrodatnými odchylkami s uvedeny v tab. 5.11 až tab. 5.13.

Tab. 5.11: Ocel 12 014 - parametry teplotní závislosti nárazové práce KV

| Orientace | A | B | R | s |
|-----------|--------|--------|--------|--------|
| A | 2,1544 | 0,0333 | 0,9577 | 0,2489 |
| R | 1,7663 | 0,0380 | 0,9489 | 0,2652 |
| T | 1,6097 | 0,0387 | 0,9672 | 0,2132 |



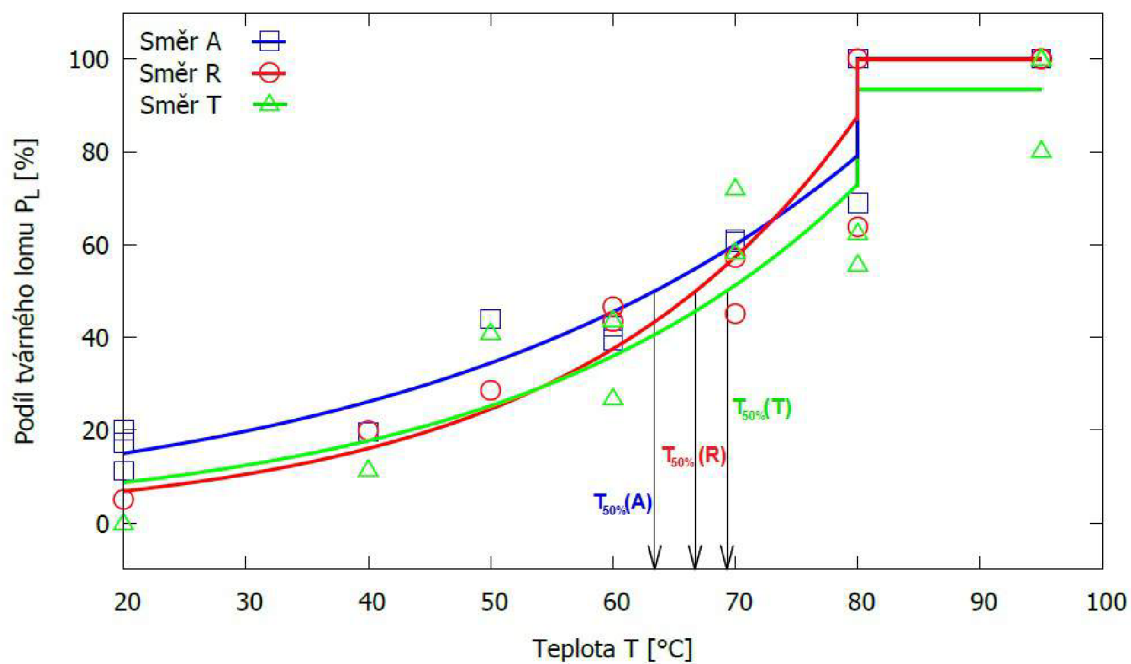
Obr. 5.8: Ocel 12 014 - zkouška rázem v ohybu, teplotní závislost nárazové práce.

Tab. 5.12: Ocel 12 014 - Parametry teplotní závislosti podílu tvárného lomu P_L

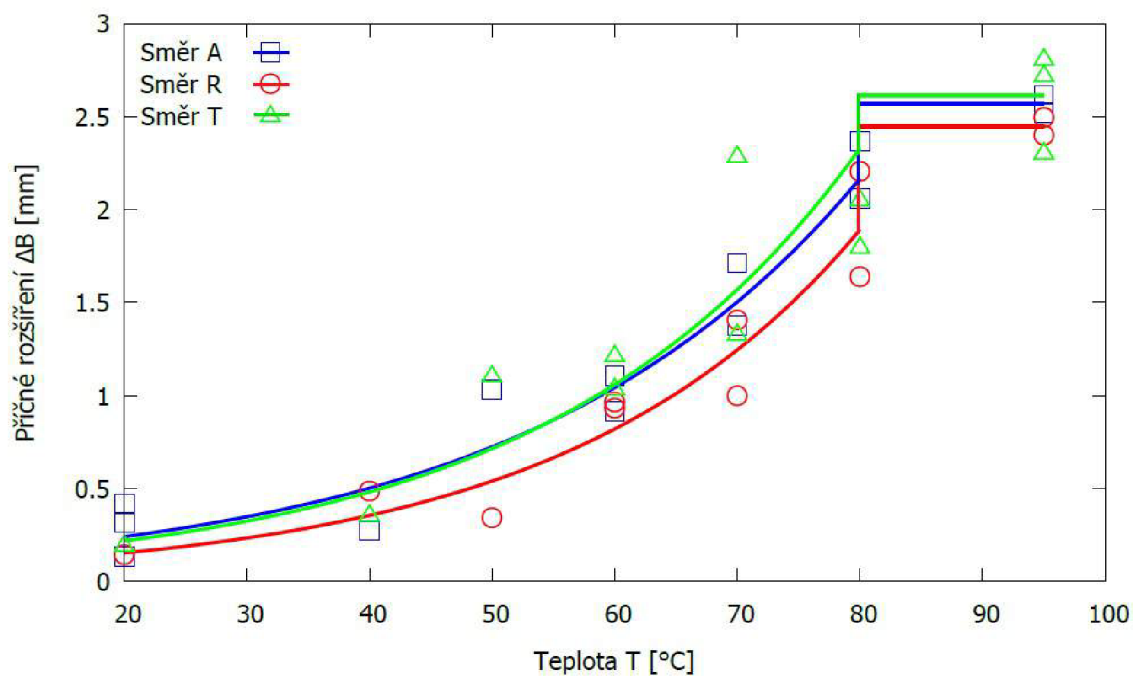
| Orientace | A | B | R | s |
|-----------|--------|--------|--------|--------|
| A | 2,1552 | 0,0277 | 0,9538 | 0,2169 |
| R | 1,0798 | 0,0424 | 0,9656 | 0,2398 |
| T | 1,4600 | 0,0354 | 0,8316 | 0,3594 |

Tab. 5.13: Ocel 12 014 - Parametry teplotní závislosti příčného rozšíření ΔB

| Orientace | A | B | R | s |
|-----------|---------|--------|--------|--------|
| A | -2,1502 | 0,0365 | 0,9250 | 0,3733 |
| R | -2,7027 | 0,0417 | 0,9601 | 0,2554 |
| T | -2,3043 | 0,0394 | 0,9465 | 0,2820 |



Obr. 5.9: Ocel 12 014 - zkouška rázem v ohybu, teplotní závislost podílu tvárného lomu.



Obr. 5.10: Ocel 12 014 - zkouška rázem v ohybu, teplotní závislost příčného rozšíření.

Z teplotních závislostí středních hodnot podílů tvárného lomu P_L pro všechny orientace vrubu byly určeny teploty $T_{50\%}$. Souhrnně jsou uvedeny v tab. 5.14 a vyznačeny v obr. 5.9.

Tab. 5.14: Ocel 12 014 - hodnoty teploty $T_{50\%}$

| Orientace | $T_{50\%}$ [°C] |
|-----------|-----------------|
| A | 63 |
| R | 67 |
| T | 69 |

5.6 Penetrační zkouška

Pro penetrační zkoušku byl použit trhací stroj Zwick Z250 Allround-line tCII s dynamometrem 50 kN. Testování probíhalo v intervalu teplot -80 °C až 20 °C . Požadované teploty zkušebního tělesa bylo dosaženo ochlazováním parami kapalného dusíku v teplotní komoře s výdrží na požadované teplotě minimálně 10 min.

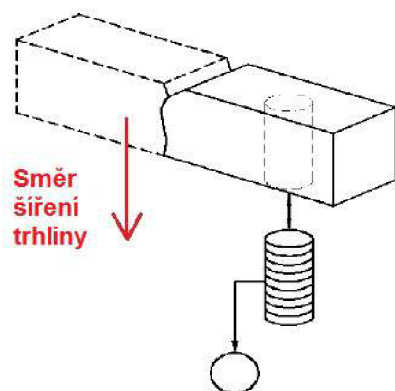
Zkušební tělesa tvaru disků o průměru 8 mm a tloušťce cca 0,6 mm byla připravována odřezáváním z broušených tyčí, odebraných z výchozího výkovku ve třech směrech, viz schema na obr. 5.1. Na požadovanou tloušťku 0,5 mm byla dobrušována na metalografické brusce (Struers pedemin, brusný papír zrnitosti 1200 a 2000). Finální úprava spočívala v leštění diamantovou pastou s velikostí zrna $3\text{ }\mu\text{m}$. Rozměry zkušebních těles jsou v souladu s CWA 15627 [15], stejně tak jejich orientace vzhledem k orientaci vrubů zkušebních těles pro zkoušku rázem v ohybu, kdy dle CWA 15627 má být axiální osa disků rovnoběžná se směrem šíření trhliny v Charpy tělese, tj. rovina disku má být ke směru šíření trhliny v tělese kolmá (obr. 5.11). Značení zkušebních těles a jejich orientace vůči polotovaru je uvedeno ve schématu na obr. 5.1.

Na obr. 5.12 je znázorněna teplotní závislost lomové energie E_f , kde s klesající teplotou hodnota E_f roste. Hodnoty lomových energií pro všechny tři směry tváření byly proloženy exponenciální rovnicí ve tvaru $E_f = \exp(A + BT)$. Střední hodnoty lomových energií pro jednotlivé orientace jsou dány rov. 5.9 až rov. 5.11.

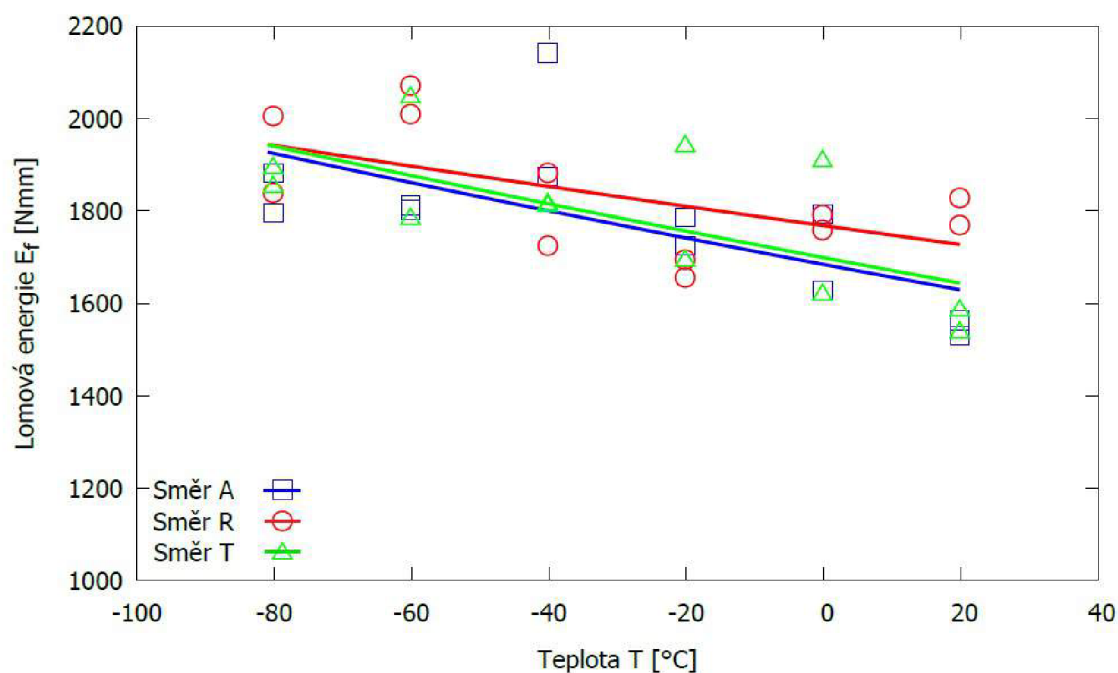
$$E_{f(A)} = \exp(7,883 - 0,002T), \quad (5.9)$$

$$E_{f(R)} = \exp(7,797 - 0,001T), \quad (5.10)$$

$$E_{f(T)} = \exp(7,890 - 0,002T). \quad (5.11)$$



Obr. 5.11: Umístění zkušebního tělesa pro penetrační zkoušku vůči zkušebnímu tělesu s V-vrubem [14].



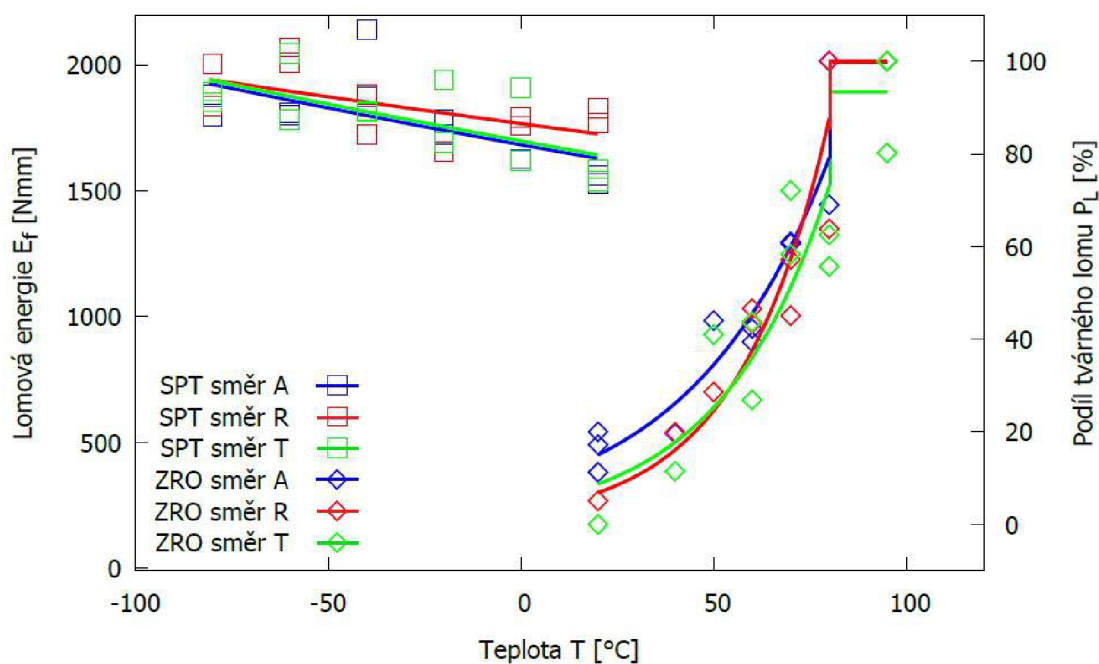
Obr. 5.12: Ocel 12 014 - penetrační zkouška, teplotní závislost lomové energie.

V oblasti vyšších teplot jsou pro radiální směr tváření pozorovány nepatrně vyšší hodnoty lomové energie E_f (obr. 5.12) než pro směry axiální a tangenciální. V teplotách blízcích se tranzitní oblasti jsou hodnoty E_f pro všechny směry srovnatelné.

5.7 Korelace penetrační zkoušky se zkouškou rázem v ohybu

Obecně platí (viz např. [6, 11]), že teplotní závislosti charakteristických veličin, získaných při zkoušce rázem v ohybu jsou posunuty k vyšším teplotám oproti teplotním závislostem charakteristik typických pro penetrační zkoušky na miniaturních discích. Diference v poloze tranzitních křivek a tím i tranzitních teplot, používaných pro hodnocení tranzitního lomového chování je dána rozdílným charakterem obou testů (charakter napjatosti, zatížený objem, dynamika zkoušky apod.).

Posuv tranzitních křivek byl prokázán i pro ocel 12 014. Z obr. 5.13 je patrná nejen poloha tranzitní oblasti v jednotlivých směrech pro případ zkoušky rázem v ohybu, ale i skutečnost, že v případě penetračních testů nebylo z důvodu experimentálního uspořádání dosaženo dostatečně nízkých teplot, za kterých by se projevila konverze tvárného typu porušení na porušení štěpné. Lze se ovšem domnívat (viz dále), že nejnižší dosažená teplota ($-80\text{ }^{\circ}\text{C}$) leží velmi blízko teplotní hranici, kdy dochází k typickému prudkému poklesu v teplotní závislosti lomové energie, viz obr. 4.8.



Obr. 5.13: Ocel 12 014 - Srovnání tranzitních křivek SPT a ZRO.

Odhad tranzitní teploty T_{SP}

Z teplotní závislosti lomové energie (obr. 5.13, příp. obr. 5.12) lze předpokládat, že se tranzitní oblast pro ocel 12 014 bude vyskytovat při teplotách nižších

než $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro určení, resp. odhad tranzitní teploty T_{SP} byly použity dva korelační vztahy, odvozené a experimentálně ověřené pro podobné typy ocelí, jaká byla použita v experimentální části diplomové práce. Rov. 5.12 byla empiricky stanovena pro feriticko-perlitické oceli [11], rov. 5.13 pro oceli uhlíkové a nízkolegované [6].

$$T_{\text{SP_Con}} = 0,56 \cdot T_{50\%}, \quad (5.12)$$

$$T_{\text{SP_Mat}} = \frac{T_{50\%} + 10,639}{2,3661}. \quad (5.13)$$

Tab. 5.15: Ocel 12 014 - Odhad tranzitní teploty

| Orientace | $T_{50\%}$ [$^{\circ}\text{C}$] | $T_{\text{SP_Con}}$ [$^{\circ}\text{C}$] | $T_{\text{SP_Mat}}$ [$^{\circ}\text{C}$] |
|-----------|-----------------------------------|---|---|
| A | 63 | -85 | -136 |
| R | 67 | -83 | -134 |
| T | 69 | -81 | -133 |

Odhadnuté tranzitní teploty T_{SP} pro jednotlivé směry jsou souhrnně uvedeny v tab. 5.15. Vzhledem k mikrostruktuře oceli 12 014, tvořené prakticky čistým feritem a pouze minoritním podílem perlitu by měl realitě více odpovídat odhad tranzitní teploty podle rov. 5.12. Průběh křivek závislosti E_f-T na obr. 5.13 nasvědčuje tomu, že uvedený předpoklad je správný.

6 DISKUZE

Cílem práce bylo posoudit vliv orientace zkušebních těles užívaných pro penetrační zkoušky na miniaturních discích na hodnotu tranzitní teploty T_{SP} a srovnat tranzitní lomové chování při tomto způsobu zatěžování s tranzitním lomovým chováním při zkoušce rázem v ohybu.

S ohledem na plánovaný experimentální program byla jako experimentální materiál zvolena ocel 12 014. Jedná se o nízkouhlíkovou feritickou ocel s malým množstvím lamelárního perlitu a terciárního cementitu. Střední velikost feritického zrna, určená ve třech směrech vzhledem ke směru tváření polotovaru (axiálním, radiálním a tangenciálním) neprokázala výrazné protažení zrn v žádném z uvedených směrů, ze strukturního hlediska se materiál jevil jako izotropní a homogenní. Ačkoliv bylo dodavatelem oceli deklarováno, že se jedná o ocel v tepelně nezpracovaném stavu, dle rovnoosých feritických zrn lze předpokládat, že na polotovaru pro výrobu zkušebních těles bylo provedeno z našeho pohledu nežádoucí rekrytalizační žíhání.

Základní mechanické charakteristiky zjištěné zkouškou tahem (R_e , R_m a A) byly srovnány s hodnotami těchto charakteristik, určenými z penetračních zkoušek a získanými pomocí korelačních vztahů, uváděných v literatuře. V případě použité feritické oceli 12 014 se pro výpočet meze kluzu jako realitě nejlépe odpovídající rovnice jeví vztah, ve kterém je použito smluvně určené hodnoty síly na mezi kluzu, $F_{e,t/10}$. Tato rovnice poskytuje nejen poměrně přesný odhad úrovně meze kluzu, ale zároveň postihuje i rozdíly v hodnotách meze kluzu v axiálním a radiálním směru vůči směru tváření polotovaru, zjištěné standardní zkouškou tahem.

I když je v řadě prací ukázáno, že pro výpočet meze pevnosti z výsledků penetračních testů je lépe použít rovnice obsahující veličinu u_m , tj. posunutí razníku v okamžiku dosažení maximální síly, v případě feritické oceli 12 014 se tento předpoklad nepotvrdil. Lepší shodu s výsledky standardních tahových zkoušek vykazovaly meze pevnosti vypočtené podle rovnice tento člen neobsahující. Co ovšem nekorresponduje s výsledky standardních tahových zkoušek jsou vypočtené meze pevnosti R_m v jednotlivých směrech. Hodnoty meze pevnosti i hodnoty maximálních sil F_m v radiálním směru jsou při penetračních testech vyšší než ve směru axiálním na rozdíl od zkoušek tahem, kde je situace opačná.

Výpočet tažnosti z penetračních zkoušek je zatížen velkou chybou, v literatuře uváděné empirické korelační rovnice neposkytují dostatečně dobrý odhad ani pro relativně jednoduché slitiny, mezi které feritická ocel 12 014 patří. Hodnoty tažnosti z penetračních zkoušek jsou oproti standardním hodnotám přibližně poloviční. Jednou z příčin je diametrální rozdíl ve velikosti zatěžovaného objemu materiálu, kdy k podobným disproporcím při určování deformačních charakteristik dochází i v případě použití miniaturních tahových zkušebních těles.

Při zkouškách rázem v ohybu se u použitého materiálu neprojevil vliv směru odběru zkušebních těles. Vliv orientace vrubu byl zanedbatelný, což je patrné z teplotních závislostí všech měřených veličin, tj. nárazové práce, podílu tvárného lomu na lomové ploše a příčného rozšíření. Prakticky shodným tranzitním křivkám pro jednotlivé směry (orientace vrubu) odpovídají i takřka shodné tranzitní teploty $T_{50\%}$. Rozdíl mezi hodnotami tranzitních teplot v radiálním (popř. tangenciálním) směru a směru axiálním činí pouze asi $6\text{ }^{\circ}\text{C}$, přičemž ve směru radiálním je podle očekávání tranzitní teplota vyšší. Minimální rozdíly v průbězích tranzitních křivek i v samotném lomovém chování pro jednotlivé směry jsou v souladu s pozorovanou mikrostrukturou, která byla v celém objemu materiálu velmi homogenní.

Výše uvedené závěry pro zkoušku rázem v ohybu jsou platné i pro výsledky penetračních zkoušek. Teplotní závislosti lomové energie E_f pro jednotlivé směry vykazují vzájemně pouze minimální rozdíly. Nepatrně odlišné je při vyšších teplotách chování materiálu v radiálním směru, kdy lomová energie nabývá vyšších hodnot oproti směru tangenciálnímu a axiálnímu. Tento rozdíl je však velmi malý a s klesající teplotou zaniká. Velmi malé rozdíly v tranzitním chování oceli 12 014 pro jednotlivé směry při penetračních testech lze dát opět do souvislosti s velmi nevýraznou, resp. úplně chybějící anizotropií struktury oceli. Z důvodu experimentálního uspořádání protlačovacích zkoušek nebylo možné dosáhnout teploty nižší než $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro získání kompletních tranzitních křivek a přesné hodnoty tranzitní teploty T_{SP} by bylo nutné pokračovat v určování lomové energie i při nižších teplotách než výše uvedené. Z tohoto důvodu byly pro výpočet, resp. odhad tranzitních teplot T_{SP} v jednotlivých směrech použity korelační rovnice. V literatuře uváděná rovnice, platná pro feriticko-perlitické oceli poskytla výsledky naznačující, že při experimentech dosažená nejnižší teplota leží blízko teplotní hranice, kde se nalézá charakteristický prudký zlom na tranzitní křivce, tj. v blízkosti maxima lomové energie na tranzitní křivce a tedy i v blízkosti skutečné tranzitní teploty T_{SP} .

Vypočtené tranzitní teploty leží pro jednotlivé směry v intervalu od $-81\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-85\text{ }^{\circ}\text{C}$, což naznačuje, že ani z tohoto hlediska se nepodařilo prokázat vliv orientace zkušebních těles pro penetrační zkoušku na tranzitní chování studované oceli. Je nutné si ovšem opět uvědomit velmi nízkou úroveň anizotropie struktury experimentálního materiálu.

7 ZÁVĚR

V diplomové práci byl studován vliv orientace zkušebních těles na tranzitní teplotu a tranzitní lomové chování, určené pomocí penetračních zkoušek na miniaturních discích. Jako experimentální materiál byla použita nízkouhlíková ocel ČSN 41 2014 s primárně feritickou strukturou.

Z důvodu experimentálního uspořádání nebylo možné dosáhnout teplot nižších než -80°C a nebylo tak možné určit hodnoty tranzitních teplot T_{SP} empiricky. Pro odhad tranzitních teplot byl proto použit korelační vztah mezi tranzitní teplotou $T_{50\%}$ a teplotou T_{SP} , platný podle literárních pramenů pro podobné typy ocelí. Vzhledem k nejednoznačné anizotropii struktury materiálu polotovaru, použitého k výrobě zkušebních těles nebyl v práci prokázán vliv orientace zkušebních těles nejen na výsledky penetračních zkoušek na miniaturních discích, ale ani výraznější vliv na výsledky zkoušek standardních.

LITERATURA

- [1] MANAHAN, M.P., A.S. ARGON a O.K. HARLING. The development of a miniaturized disk bend test for the determination of postirradiation mechanical properties. *Journal of Nuclear Materials* [online]. 1981, **104**, 1545-1550 [cit. 2017-03-29]. DOI: 10.1016/0022-3115(82)90820-0.
- [2] HUANG, F. M., M. L. HAMILTON a G. L. WIRE. Bend Testing for Miniature Disks. *Nuclear Technology*. 1982, (Vol. 57), 234-242.
- [3] FLEURY, Eric a Jeong Soo HA. *Small punch tests on steels for steam power plant (II)* [online]. [cit. 2017-02-23]. DOI: 10.1007/BF02945550. ISBN 10.1007/BF02945550.
- [4] LACALLE, R., J. A. ÁLVAREZ a F. GUTIÉRREZ-SOLANA. *Analysis of key factors for the interpretation of small punch test results** [online]. [cit. 2017-02-23]. DOI: 10.1111/j.1460-2695.2008.01262.x. ISBN 10.1111/j.1460-2695.2008.01262.x.
- [5] 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* [online]. [cit. 2017-02-23]. DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.08.009. ISBN 10.1016/j.jallcom.2013.08.009.
- [6] MATOCHA, Karel. *Hodnocení mechanických vlastností konstrukčních ocelí pomocí penetračních testů*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, katedra materiálového inženýrství, 2010. ISBN 978-80-248-2223-5.
- [7] RASCHE, Stefan a Meinhard KUNA. Improved small punch testing and parameter identification of ductile to brittle materials. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* [online]. 2015, 125, 23-34 [cit. 2017-05-14]. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2014.09.001. ISSN 03080161.
- [8] 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. 2017-04-27]. DOI: 10.1016/S0308-0161(98)00074-X. ISSN 03080161.
- [9] HA, J.S. a E. FLEURY. Small punch tests to estimate the mechanical properties of steels for steam power plant: II. Fracture toughness. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* [online]. 1998, 75(9), 707-713 [cit. 2017-05-14]. DOI: 10.1016/S0308-0161(98)00075-1. ISSN 03080161.

- [10] PETERSEN, D. R., R. E. LINK, F. DOBEŠ a K. MILIČKA. Small Punch Testing in Creep Conditions. *Journal of Testing and Evaluation* [online]. 2001, 29(1), 31-35 [cit. 2017-05-14]. DOI: 10.1520/JTE12388J. ISSN 00903973.
- [11] 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* [online]. [cit. 2017-02-23]. DOI: 10.1111/j.1460-2695.2008.01259.x. ISBN 10.1111/j.1460-2695.2008.01259.x.
- [12] SHEKHTER, A., A.B.L. CROKER, A.K. HELLIER, C.J. MOSS a S.P. RINGER. Towards the correlation of fracture toughness in an ex-service power generating rotor. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* [online]. 2000, 77(2-3), 113-116 [cit. 2017-05-14]. DOI: 10.1016/S0308-0161(99)00091-5. ISSN 03080161.
- [13] NORRIS, S.D. A comparison of the disk bend test and the Charpy impact test for fracture property evaluation of power station steels. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 1997, 74 (2), 135-144 [online]. [cit. 2017-02-23]. DOI: 10.1016/S0308-0161(97)00112-9. ISBN 10.1016/S0308-0161(97)00112-9.
- [14] MATOCHA, Karel. The Use of Small Punch Tests for Determination of Fracture behaviour of Ferritic Steels. *1.st International Conference on Structural Integrity, ICONS-2014*. 2014 [online]. [cit. 2017-04-23] DOI: 10.1016/j.proeng.2014.11.110. ISBN 10.1016/j.proeng.2014.11.110.
- [15] CEN Workshop Agreement, CWA 15627. *Small Punch Test Method for Metallic Materials*. Revize (E). Rue de Stassart, 36 B-1050 Brussels: European Committee For Standardization, 2007.
- [16] ACHARYA, S. a K.K. RAY. Assessment of tensile properties of spot welds using shear punch test. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2013, 565, 405-413 [cit. 2017-04-27]. DOI: 10.1016/j.msea.2012.12.068. ISSN 09215093.
- [17] BRUCHHAUSEN, M., S. HOLMSTRÖM, I. SIMONOVSKI, T. AUSTIN, J.-M. LAPETITE, S. RIPPLINGER a F. DE HAAN. Recent developments in small punch testing: Tensile properties and DBTT. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* [online]. 2016, 86, 2-10 [cit. 2017-04-21]. DOI: 10.1016/j.tafmec.2016.09.012. ISSN 01678442.
- [18] BŘEZINA, Martin a Ľudovít KUPČA. Možnosti využitia systému na odber malých vzoriek z prevádzkovaných zariadení pri hodnotení vlastností materiálov. *Chemické Listy*. 2011, (105), 167-170.

- [19] ALTSTADT, E., H.E. GE, V. KUKSENKO, et al. Critical evaluation of the small punch test as a screening procedure for mechanical properties. *Journal of Nuclear Materials* [online]. 2016, **472**, 186-195 [cit. 2017-03-29]. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2015.07.029. ISSN 00223115.
- [20] MAO, Xinyuan a Hideaki TAKAHASHI. Development of a further-miniaturized specimen of 3 mm diameter for tem disk (ϕ 3 mm) small punch tests. *Journal of Nuclear Materials* [online]. 1987, 150(1), 42-52 [cit. 2017-04-02]. DOI: 10.1016/0022-3115(87)90092-4. ISSN 00223115.
- [21] RODRÍGUEZ, C., M. FERNÁNDEZ, J.G. CABEZAS, T.E. GARCÍA a F.J. BELZUNCE. The use of the small punch test to solve practical engineering problems. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* [online]. 2016, 86, 109-116 [cit. 2017-04-02]. DOI: 10.1016/j.tafmec.2016.08.021. ISSN 01678442.
- [22] RODRIGUEZ, C., J. GARCIA CABEZAS, E. CARDENAS, F. J. BELZUNCE a C. BETEGON. Mechanical Properties Characterization of Heat-Affected Zone Using the Small Punch Test. *Welding Journal* [online]. 2009, (88), 188-192 [cit. 2017-04-02].
- [23] FOULDS, J.a R. VISWANATHAN. Small Punch Testing for Determining the Material Toughness of Low Alloy Steel Components in Service. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 1994, Vol. 116, 457-464 [cit. 2017-04-20].
- [24] BULLOCH, J.H..Toughness losses in low alloy steels at high temperatures: An appraisal of certain factors concerning the small punch test. *International Journal of Pressure Vessels and Pipipng*. 1998, 75, 791-804 [cit. 2017-04-20].
- [25] MISAWA, T., T. ADACHI, M. SAITO a Y. HAMAGUCHI. Small punch tests for evaluating ductile-brittle transition behavior of irradiated ferritic steels. *Journal of Nuclear Materials* [online]. 1987, 150(2), 194-202 [cit. 2017-04-24]. DOI: 10.1016/0022-3115(87)90075-4
- [26] WU, F. F., Z. F. ZHANG, F. JIANG, J. SUN, J. SHEN a S. X. MAO. Multiplication of shear bands and ductility of metallic glass. *Applied Physics Letters* [online]. 2007, 90(19), 191909- [cit. 2017-05-21]. DOI: 10.1063/1.2738366. ISSN 00036951.
- [27] DIN EN ISO 148-1. *Metallic materials - Charpy pendulum impact test*. Normenausschuss Materialprüfung, 2011.
- [28] ZHANG, Guangming, Zhangjian ZHOU, Man WANG, Shaofu LI, Lei ZOU a Liwei ZHANG. Tensile and Charpy impact properties of an

- ODS ferritic/martensitic steel 9Cr–1.8W–0.5Ti–0.35Y2O3. *Fusion Engineering and Design* [online]. 2014, 89(4), 280-283 [cit. 2017-04-28]. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2014.01.067. ISSN 09203796.
- [29] NDT Resource Center. *Impact Toughness* [online]. [cit. 2017-05-21] <https://www.nde-ed.org>
- [30] FIALOVÁ M.. Vliv orientace zkušebních těles na tranzitní teplotu T_{sp} stanovenou penetračními testy. *Bakalářská práce*. 2011, Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [31] TURBA, K., R.C. HURST a P. HÄHNER. Anisotropic mechanical properties of the MA956 ODS steel characterized by the small punch testing technique. *Journal of Nuclear Materials* [online]. 2012, 428(1-3), 76-81 [cit. 2017-05-14]. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2011.08.042. ISSN 00223115.
- [32] ALTSTADT, E., M. SERRANO, M. HOUSKA a A. GARCÍA-JUNCEDA. Effect of anisotropic microstructure of a 12Cr-ODS steel on the fracture behaviour in the small punch test. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2016, **654**, 309-316 [cit. 2017-03-29]. DOI: 10.1016/j.msea.2015.12.055. ISSN 09215093.
- [33] OKUDA, Naoyuki, Ryuta KASADA a Akihiko KIMURA. Statistical evaluation of anisotropic fracture behavior of ODS ferritic steels by using small punch tests. *Journal of Nuclear Materials* [online]. 2009, 386-388, 974-978 [cit. 2017-05-20]. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2008.12.265. ISSN 00223115.
- [34] ČSN 41 2014. Uhlíková magneticky měkká ocel. *Materiálový list*.
- [35] ČSN EN ISO 643. *Ocel - Mikrografické stanovení velikosti zrn*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [36] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [37] DIN EN 50125. *Testing of metallic materials - Tensile test pieces*. German Institute for Standardisation. 2004-01
- [38] ČSN EN ISO 3785. *Kovové materiály - Označování os zkušebních těles v návaznosti na texturu výrobku*. Český normalizační institut, 2006.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

| | | |
|--|--------|--|
| $\alpha_1, \alpha_2, \alpha'$ | | materiálové konstanty |
| $\beta_1, \beta_2, \beta'_1, \beta'_2$ | | materiálové konstanty |
| A | [%] | tažnost |
| d_0 | [m] | počáteční průměr zkušebního tělesa pro zkoušku tahem |
| d_g | [m] | střední velikost zrna |
| E | [MPa] | modul pružnosti v tahu |
| E_f | [N·mm] | lomová energie |
| F | [N] | síla |
| F_e | [N] | síla na mezi kluzu |
| F_f | [N] | síla při lomu zkušebního tělesa |
| F_m | [N] | síla na mezi pevnosti |
| KV | [J] | nárazová práce |
| L_T | [m] | poměr délky úsečky na obrázku a celkového zvětšení (výpočet střední velikosti zrna) |
| \bar{N} | [-] | průměrný počet zrn |
| P_L | [%] | podíl tvárného lomu |
| R | [-] | koeficient korelace |
| R_e | [MPa] | mez kluzu |
| R_{eH} | [MPa] | horní mez kluzu |
| R_{eL} | [MPa] | dolní mez kluzu |
| R_m | [MPa] | mez pevnosti |
| s | | směrodatná odchylka |
| t | [m] | tloušťka zkušebního tělesa pro penetrační zkoušku |
| t_0 | [m] | počáteční tloušťka zkušebního tělesa pro penetrační zkoušku |

| | | |
|------------|---------|---|
| T | [K, °C] | teplota |
| T_{SP} | [K, °C] | tranzitní teplota (penetrační zkouška) |
| $T_{50\%}$ | [°C] | tranzitní teplota při 50% podílu tvárného lomu (zkouška rázem v ohybu) |
| T_{27J} | [°C] | tranzitní teplota při hodnotě nárazové práce 27J (zkouška rázem v ohybu) |
| u | [m] | posunutí razníku |
| u_e | [m] | posunutí razníku odpovídající síle na mezi kluzu |
| u_f | [m] | posunutí razníku při porušení zkušební tělesa |
| u_m | [m] | posunutí razníku při maximální zátěžné síle |
| Z | [%] | kontrakce |
| FATT | | Fracture Appearance Transition Temperature – teplota při 50% podílu tvárného lomu |
| SPT | | Small Punch Test - penetrační (protlačovací) zkouška na miniaturních discích |
| ZRO | | Zkouška rázem v ohybu |
| CEN | | European Committee for Standardization – Evropská komise pro standardizaci |
| DBTT | | Ductile-Brittle Transition Temperature – tranzitní teplota přechodu štěpný–tvárný lom (zkouška rázem v ohybu) |
| BCC | | Body Centric Cube - prostorově středěná kubická mřížka |
| ODS | | Oxygen dispersion strengthened alloys – slitiny disperzně zpevněné oxidy |
| A | | axiální orientace zkušební tělesa |
| R | | radiální orientace zkušební tělesa |
| T | | tangenciální orientace zkušební tělesa |

Al_2O_3

oxid hlinitý (korund)

WC

karbid wolframu

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | | |
|------|---|----|
| 3.1 | Přípravky pro penetrační zkoušku | 5 |
| 3.2 | Závislost působící síly na posunutí razníku | 6 |
| 3.3 | Zkušební tělesa pro penetrační zkoušku | 7 |
| 3.4 | Schéma odběru vzorku materiálu | 8 |
| 3.5 | Závislost působící síly na posunutí razníku | 9 |
| 3.6 | Závislost zatížení na posunutí razníku pro různé počáteční tloušťky zkušebních těles | 10 |
| 3.7 | Metody určení meze kluzu | 11 |
| 4.1 | Srovnání tranzitních křivek křehkého a houževnatého chování ma- teriálu při penetrační zkoušce | 13 |
| 4.2 | Tvárný lom | 13 |
| 4.3 | Tvárný lom, výrazné zmenšení tloušťky disku v místě lomu | 14 |
| 4.4 | Štěpný lom | 14 |
| 4.5 | Štěpný lom, nevýrazná plastická deformace v místě lomu | 14 |
| 4.6 | Teplotní závislost nárazové práce, teplotní závislost podílu tvárného lomu | 15 |
| 4.7 | Schéma lomové plochy | 16 |
| 4.8 | Srovnání tranzitních křivek při zkoušce rázem v ohybu a penetrační zkoušce | 17 |
| 4.9 | Mikrostruktura - vliv směru tváření | 18 |
| 4.10 | Teplotní závislost lomové energie | 19 |
| 5.1 | Označení zkušebních těles | 20 |
| 5.2 | Místa odběru vzorků pro analýzu mikrostruktury | 21 |
| 5.3 | Mikrostruktura oceli | 22 |
| 5.4 | Mikrostruktura oceli v axiálním směru | 22 |
| 5.5 | Mikrostruktura oceli v radiálním směru | 23 |
| 5.6 | Mikrostruktura oceli v tangenciálním směru | 23 |
| 5.7 | Označení orientace zkušebních těles vzhledem k polotovaru ve tvaru radiálně tvářené tyče | 28 |
| 5.8 | Teplotní závislost nárazové práce | 29 |
| 5.9 | teplotní závislost podílu tvárného lomu | 30 |
| 5.10 | teplotní závislost příčného rozšíření | 30 |
| 5.11 | Umístění zkušebního tělesa pro penetrační zkoušku vůči zkušebnímu tělesu s V-vrubem | 32 |
| 5.12 | Teplotní závislost lomové energie | 32 |
| 5.13 | Srovnání tranzitních křivek SPT a ZRO | 33 |

SEZNAM TABULEK

| | | |
|------|--|----|
| 5.1 | Označení zkušebních těles | 20 |
| 5.2 | Chemické složení oceli RFe80, W.-Nr. 1.104 | 21 |
| 5.3 | Chemické složení oceli 12 014 | 21 |
| 5.4 | Střední velikost feritického zrna | 24 |
| 5.5 | Tvrдость | 24 |
| 5.6 | Základní mechanické charakteristiky, axiální směr (A) | 25 |
| 5.7 | Základní mechanické charakteristiky, radiální směr (R) | 25 |
| 5.8 | Srovnání mezí kluzu | 26 |
| 5.9 | Srovnání mezí pevnosti | 27 |
| 5.10 | Srovnání hodnot tažnosti | 27 |
| 5.11 | Parametry teplotní závislosti nárazové práce | 28 |
| 5.12 | Parametry teplotní závislosti podílu tvárného lomu | 29 |
| 5.13 | Parametry teplotní závislosti příčného rozšíření | 29 |
| 5.14 | Hodnoty tranzitní teploty | 31 |
| 5.15 | Odhad tranzitní teploty | 34 |