



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

PROTLAČOVACÍ ZKOUŠKA KONSTRUKČNÍCH OCELÍ ZA SNÍŽENÝCH TEPLIT

SMALL-PUNCH TEST OF STRUCTURAL LOW TEMPERATURES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. EVA NĚMČÍKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR
BRNO 2013

Ing. HYNEK HADRABA, Ph.D.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství

Akademický rok: 2012/13

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Eva Němčíková

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Materiálové inženýrství (3911T011)**

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:

Protlačovací zkouška konstrukčních ocelí za snížených teplot

v anglickém jazyce:

Small-punch test of structural steels at low temperatures

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Protlačovací zkouška small-punch test je miniaturizovanou zkušební metodou, původně vyvinutou pro posouzení zbytkové životnosti komponent v průběhu jejich používání. Technika umožňuje určit základní mechanické vlastnosti materiálu, jako je mez kluzu a mez pevnosti. Cílem práce je posoudit vhodnost této měřicí metody na odhad tahové zkoušky ocelí používaných v energetickém průmyslu za pokojových a snížených teplot.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je ověřit korelaci tahových vlastností konstrukčních ocelí používaných v energetickém průmyslu zjištěných tahovou zkouškou s charakteristikami zjištěnými protlačovací metodou na miniaturních discích. Zkoušky budou provedeny za pokojové teploty a za nízkých teplot s cílem ověřit možnost podchycení teplotní závislosti základních mechanických charakteristik použitých ocelí a jejich porovnání se standardními testy.

Seznam odborné literatury:

Matocha K.: Hodnocení mechanických vlastností konstrukčních ocelí pomocí penetračních testů. VŠB-TU Ostrava a Materiálový a metalurgický výzkum s.r.o. 2010. ISBN 978-80-248-2223-5

CWA 15627, 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, 2007.

Lucas G.E.: The development of small specimen mechanical test techniques. Journal of Nuclear Materials 117 (1983) 327-339.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Hynek Hadraba, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne 19.3.2013



prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na porovnání výsledků protlačovací zkoušky na miniaturních discích s výsledky tahové zkoušky konstrukčních ocelí. Pro experimenty byly vybrány oceli P91, 10Ch2MFA, 20CrNi2MoV, 11 416 a 42 2707, které se používají v jaderné energetice nebo byly za tímto účelem vyvíjeny.

Ze záznamů protlačovacích zkoušek byly pomocí vhodných korelačních vztahů vyhodnoceny hodnoty základních napětových charakteristik zkoumaných materiálů, a to meze kluzu a meze pevnosti. Získané hodnoty byly porovnány s hodnotami zjištěnými konvenční tahovou zkouškou. V práci jsou uvedeny vlastní navržené korelační vztahy a porovnání teplotních závislostí získaných z protlačovacích zkoušek a tahových zkoušek. Bylo provedeno hodnocení mikrostruktury použitých ocelí a fraktografická analýza lomových ploch.

Bylo zjištěno, že pro vyhodnocování základních mechanických charakteristik (meze kluzu a meze pevnosti) je nejvhodnější navrhnout vlastní korelační vztahy místo používání všeobecných vztahů z literatury. Také bylo zjištěno, že mechanismus lomu všech ocelí v celém teplotním rozsahu zkoušek (do -40°C) byl tvárný.

KLÍČOVÁ SLOVA

Protlačovací zkouška na miniaturních discích, tahová zkouška, ocel, jaderná energetika.

ABSTRACT

Diploma thesis is focused on comparison of small punch test results and tensile test results. For experiments were chosen steel P91, 10Ch2MFA, 20CrNi2MoV, 11 416 and 42 2707. These steel are used in nuclear power engineering, or they were developed for this purpose.

Basic mechanical characteristics, namely ultimate tensile stress and yield stress, were evaluated from small punch test records of observed materials. This is done via convenient correlation relationships. Obtained values were compared with values obtained by conventional tensile tests. There are mentioned own suggested correlation relationships and comparison of temperature curves gained from small punch test and tensile test in the thesis. Assessment of microstructure of observed materials and analysis of fracture surfaces was provided as well.

It was found out, that for assessing basic mechanical characteristics (ultimate tensile stress and yield stress) is the best to suggest own correlation relationships, instead of using universal relationships from literature. The fracture mechanism of all types of assessed steel was ductile in entire temperature range (up to -40°C).

KEY WORDS

Small punch test, tensile test, steel, nuclear power engineering.

NĚMČÍKOVÁ, E. *Protlačovací zkouška konstrukčních ocelí za snížených teplot*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 86 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Hynek Hadraba, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracovala samostatně dle pokynů vedoucího diplomové práce a použila jen prameny uvedené v seznamu literatury.

V Brně dne

Bc. Eva Němčíková



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

PODĚKOVÁNÍ

Diplomová práce vznikla s využitím zázemí Ústavu fyziky materiálů AV ČR, v. v. i. a za podpory projektu č. CZ.1.07/2.3.00/20.0214 „Rozvoj lidských zdrojů ve výzkumu fyzikálních a materiálových vlastností modelových, nově vyvíjených a inženýrsky aplikovaných materiálů“ poskytnutého Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

Touto cestou bych chtěla poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Hynku Hadrabovi, Ph.D. za ochotu, pomoc a věcné připomínky, které mi během zpracování mé práce poskytoval.

Také bych chtěla poděkovat panu Ing. Pavlu Čuperovi za umožnění provedení experimentů v laboratoři skupiny křehkého lomu AV ČR a panu Ing. Petru Dymáčkovi, Ph.D. za možnost provedení experimentů v creepové laboratoři AV ČR. Stejně tak za jeho rady, připomínky a pomoc, které mi v průběhu experimentální činnosti poskytoval.

OBSAH

1	ÚVOD.....	10
2	CÍLE PRÁCE	12
3	PROTLAČOVACÍ ZKOUŠKY NA MINIATURNÍCH DISCÍCH	13
3.1	Odebírání materiálu z povrchu součástí	14
3.2	Záznam z penetrační zkoušky	16
3.3	Hodnocení mechanických vlastností	19
3.3.1	Stanovení výsledků protlačovací zkoušky	19
3.3.2	Stanovení pevnostních charakteristik.....	21
3.3.3	Stanovení tranzitní teploty	23
3.3.4	Stanovení lomové houževnatosti na hladkých vzorcích	27
3.3.5	Stanovení lomové houževnatosti na vzorcích se zářezem	28
3.4	Protlačovací zkoušky na miniaturních discích za zvýšených teplot.....	29
4	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	32
4.1	Experimentální materiál	32
4.1.1	Ocel P91	32
4.1.2	Ocel 10Ch2MFA	33
4.1.3	Ocel 20CrNi2MoV	33
4.1.4	Ocel 11 416	34
4.1.5	Ocel ČSN 42 2707.....	35
4.2	Experimentální zařízení.....	36
4.3	Příprava vzorků	37
4.4	Příprava experimentů	38
4.5	Hodnocení zkoušek	38
5	VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ	39
5.1	Zkoušky za pokojové teploty	39
5.2	Teplotní závislosti	63
6	DISKUZE	67
7	ZÁVĚR	78
8	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	80
9	SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ	85

1 ÚVOD

U dlouhodobě používaných zařízení je potřeba kontrolovat jejich stav v pravidelných, předem určených intervalech. Těmito pravidelnými kontrolami lze posoudit integritu součásti či odhadnout její zbytkovou životnost. Predikovaná životnost součásti může být ve skutečnosti vyšší i nižší, než bylo při projektování součásti spočítáno. Včasné odstavení součásti a její výměna za novou nebo včasná oprava může zabránit katastrofě. Naopak prodloužení pracovního života součásti vede k vysokým finančním úsporám [1, 2, 3, 4, 5].

Kontrola stavu součástí a vývoj nových materiálů a je nutný také u materiálů používaných v jaderné energetice. Vývoj se týká zejména materiálů pro opláštění a vnitřní struktury fúzních reaktorů. Kontrolovat je třeba součásti, které jsou v provozu a musí odolávat silné radiaci. Patří mezi ně např. materiály pro oplášťování a potrubí. Počítačová simulace vlivu neutronů a těžkých iontů je pro hodnocení aktuálního stavu materiálů nedostačující [6].

Pro posouzení funkčnosti zařízení a jejich součástí, je nutné znát aktuální a počáteční úroveň vybraných mechanických vlastností použitých materiálů. Tyto informace jsou využívány také pro optimalizaci provozních režimů, intervalů provozních prohlídek nebo dlouhodobého plánu oprav [1, 7].

Pro posouzení funkčnosti dané součásti či zařízení je potřeba omezit provoz, protože zkoumaná součást musí být odstavena. Hodnocení součásti standardními metodami vyžaduje odběr velkého množství materiálu a následné opravy součásti, na které jsou nejčastěji navařovány kusy materiálu. Takto lze opravit pouze materiály svařitelné. Pokud se požadavek na zjištění mechanických vlastností týká malé lokalizované oblasti, např. povrchové vrstvy, povlaku, návaru nebo svarového spoje a svařováním tepelně ovlivněné oblasti, musí se zkoušení omezit na měření tvrdosti. V případě svarových spojů se používají také laboratorní simulace [1, 4, 8, 9, 10].

Některé mechanické vlastnosti lze zjistit i nedestruktivními metodami, mezi které patří mj. magnetická metoda prášková, metoda vířivých proudů, ultrazvukové zkoušky, akustická emise, zkoušky prozařováním, zkoušky tvrdosti, zkoušky na odebraných replikách nebo také zkoušky prováděné po odebrání malého množství materiálu z vnitřního nebo vnějšího povrchu součásti. Aby zkoumaná součást byla co nejméně poškozena odběrem materiálu, byla vyvinuta technologie zkoušení materiálu nazývaná Protlačovací zkoušky na miniaturních discích (aglický a nejčastěji používaný název zní *Small Punch Test - SPT*) [1, 2, 4, 9, 11, 12].

Tato metoda zkoušení byla vyvinuta pro studium radiačně zkrěhlých materiálů v Massachusettském technickém institutu (*Massachusetts Institute of Technology - MIT*). Poprvé byla publikována v roce 1981 (v časopise *Journal of Nuclear Materials* [13]) a poté intenzivně rozvíjena také v Japonsku [5, 9].

Výsledky spolupráce USA a Japonska při zdokonalování této metody byly první standardy protlačovací zkoušky na miniaturních discích. V roce 1988 je pod názvem *Recommended Practice for Small Punch (SP) Testing of Metallic Materials* publikoval Japonský výzkumný ústav pro jadernou energii (*Japanese Atomic Energy Research Institute - JAERI*) [9].

Spojené státy pracovaly na vývoji této nové techniky zkoušení materiálů také samostatně a to už od konce 80.- let. Díky společné práci Výzkumného institutu elektrické energie (*Electric Power Research Institute - EPRI*) a Asociace analýzy lomů (*Failure Analysis Associates - FAA; dnes Exponent*) s názvem *Miniature sample removal and small punch testing for in-service component FATT* [14] publikované v roce 1992 byla technika představena také v Evropě [9].

O představení protlačovacích zkoušek na miniaturních discích v Evropě se zasloužila zejména britská univerzita Swansea (*Swansea University, Wales*), britská společnost ERA (*ERA Technology*) a italská společnost CISE (dnes CESI) [9].

Vývoj techniky byl umožněn vysokou přesností servo mechanických testovacích zařízení řízených počítačem. Výsledky sice ještě nebyly příliš uspokojující, ale zlepšily se s použitím modelování metodou konečných prvků, neuronových sítí [15], lokálním přístupem (*local approach theory*) nebo speciálním vybavením, jako jsou videokamery a holografy. Prozatím však nebyl stanoven žádný konkrétní vztah mezi posunutím razníku a zatěžovací silou, resp. prohloubení vzorku a zatěžovací silou [9, 16].

Protlačovací zkoušky na miniaturních discích jsou omezovány absencí jakékoli normy pro tento typ zkoušek. Podmínky průběhu jednotlivých zkoušek sjednocuje dohoda o postupu zkoušení Metodika zkoušení kovových materiálů pomocí protlačovacích zkoušek na miniaturních discích (*Small Punch Test Method for Metallic Materials*) vydaná v roce 2007 v Bruselu. Dohodu vydala Evropská komise pro standardizaci (*European Committee for Standardization - CEN*), jejíž členem je i Česká republika [9].

2 CÍLE PRÁCE

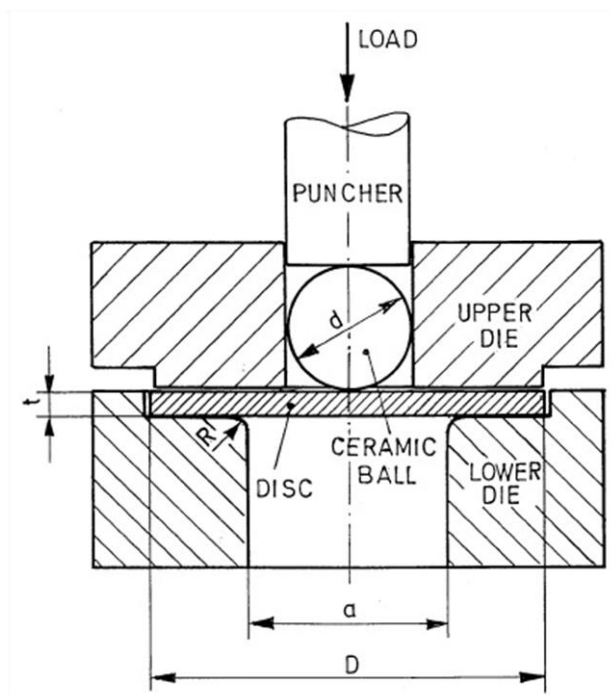
Cílem této diplomové práce bylo ověření korelace základních mechanických vlastností konstrukčních ocelí používaných v energetickém průmyslu získaných tahovou zkouškou a zkouškou na miniaturních discích. Tahové zkoušky byly provedeny za pokojové teploty, zkoušky na miniaturních discích byly provedeny v rozmezí teplot od -40 do +150 °C.

Dílčí cíle diplomové práce:

- hodnocení mikrostruktury použitých ocelí,
- fraktografická analýza lomových ploch vzorků pro provedení protlačovací zkoušky na miniaturních discích,
- realizace tahových zkoušek za pokojové teploty,
- realizace protlačovacích zkoušek na miniaturních discích,
- porovnání výsledků tahových zkoušek s výsledky zkoušek protlačovacích,
- návrh vlastních korelačních vztahů pro výpočet základních mechanických charakteristik,
- vytvoření teplotní závislosti meze kluzu a meze pevnosti pozorovaných ocelí,
- srovnání získané teplotní závislosti s teplotní závislostí z tahové zkoušky.

3 PROTLAČOVACÍ ZKOUŠKY NA MINIATURNÍCH DISCÍCH

Penetrační test je realizován průnikem razníku (*puncher*) nebo keramické kuličky (*ceramic ball*) přes střed plochého zkušební vzorku ve tvaru disku (*disc*) nebo kvádru se čtvercovou podstavou. Zkušební vzorek je uložen mezi spodní opěrnou maticí (*lower die*) a horní přítlačnou maticí (*upper die*), jak lze vidět na obr. 1 [1, 4, 17].



Obr. 1 Schematický náčrtek uspořádání vzorku, matic a zatěžovacích komponent při penetračním testu [16]

Podle tvaru penetrující části razníku se penetrační testy dělí na [1, 18]:

- kuličkové (*ball punch test*) – penetruje ocelová nebo keramická kulička,
- stříhové (*shear punch test*) – penetruje razník s ostrými hranami,
- ohybové (*disc bend test*) – penetruje kuželový razník.

Podle způsobu upnutí vzorku se penetrační testy dělí na [1, 9]:

- „Bulge Punch Test“ – těleso je sevřeno horní i dolní maticí,
- „Punch Drawing Test“ – těleso je položeno na spodní matici.

Podle způsobu zatížení vzorku se penetrační testy dělí na testy s [9, 12, 19]:

- konstantní rychlostí posuvu (*constant deflection rate – CDR*)- analogie tahové zkoušky
- konstantním zatížením (*constant force – CF*) – analogie creepové zkoušky

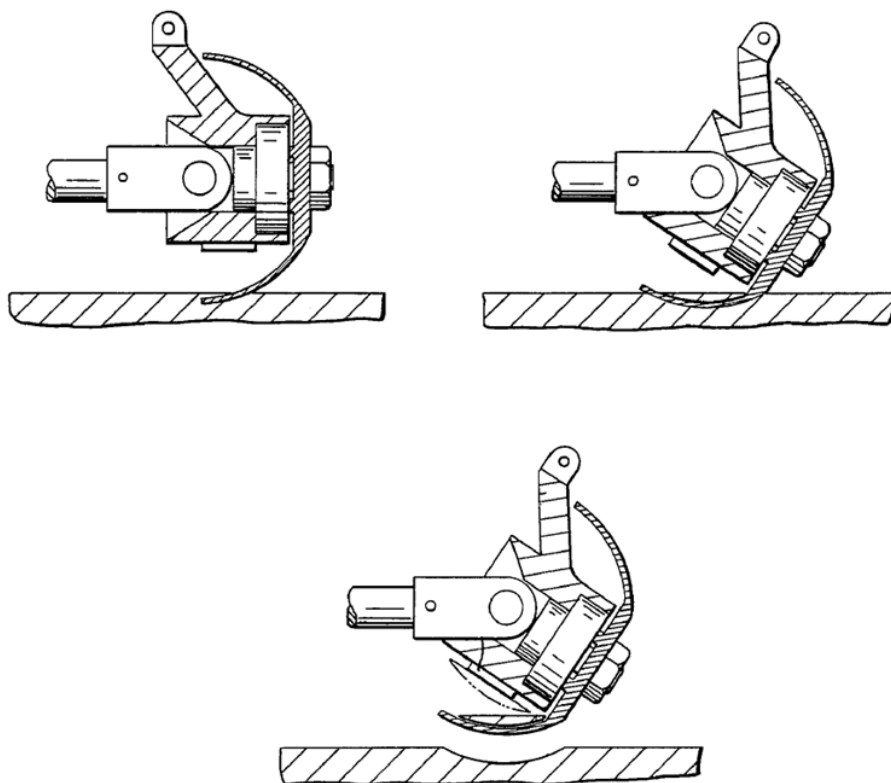
Při zkoušce s konstantní rychlostí posuvu razníku, resp. kuličky se vyhodnocuje buď závislost zatížení vs. posunutí razníku, nebo závislost zatížení vs. průhyb vzorku v ose zatěžování. Při zkoušce s konstantním zatížením působícím na vzorek se hodnotí čas v závislosti na průhybu vzorku, resp. posunutí razníku (kuličky) [1, 9, 12].

Při provádění penetračních zkoušek jsou kladeny požadavky na zkušební zařízení, zatěžovací systém, měření průhybu vzorku a rychlost zatěžování, která musí být v rozmezí 0,2 – 2 mm/min. Důležitý je rovněž sběr dat a příprava zkušební vzorku. Doporučené rozměry vzorku jsou: průměr 8 mm a tloušťka 0,5 mm [1, 9].

Zkoušky prováděné za zvýšených teplot musí probíhat v inertní atmosféře. Obvykle je pro zajištění takové atmosféry používán argon [12].

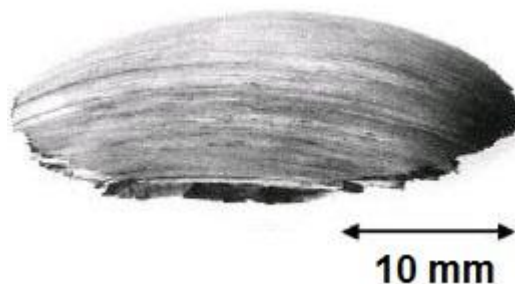
3.1 Odebírání materiálu z povrchu součásti

Odběr materiálu se provádí buď pomocí elektrojiskrového řezání, nebo mechanického odbroušení materiálu. Zařízení pro mechanický odběr materiálu, tzv. SSam systém (*Small Sampling Method – Metoda malých vzorků*) si nechal v 1989 patentovat David W. Mercaldi pracující ve firmě Failure Analysis Associates (Exponent) v Palo Alto v Kalifornii, USA. Patentovaný přístroj (obr. 2) má polokulové ostří, které se otáčí kolem své osy. Zároveň se pohybuje směrem dopředu a tím odbroušuje malý vzorek materiálu. Odbroušený vzorek je uchycen permanentním magnetem, který je součástí přístroje. Tím se zabrání poškození už odbroušeného vzorku [1, 20, 21].



Obr. 2 Zařízení pro odběr materiálu z povrchu součásti SSam [20]

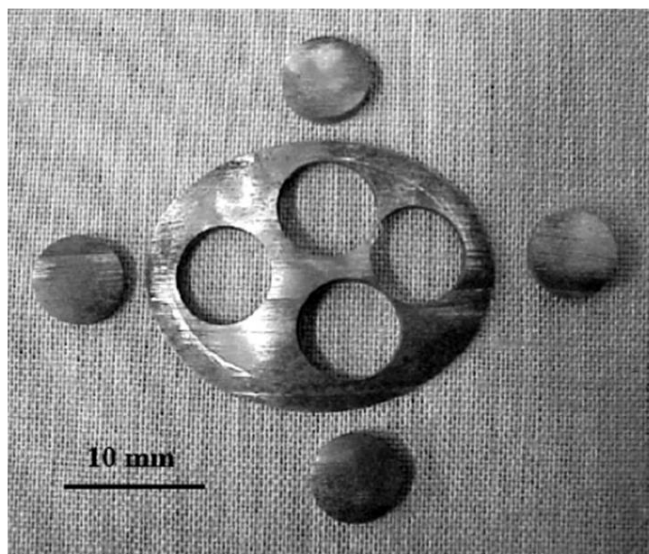
Toto zařízení odbrousí mezivrstvu mezi vzorkem a součástí. Díky velmi nízké rychlosti procesu odbroušování a intenzivnímu chlazení vodou dojde jen k minimálnímu narušení podpovrchové struktury. Odebraný materiál má tvar kulového vrchlíku o průměru cca 25 mm a výšce 3 - 4 mm (obr. 3). Velikost odebraného vzorku s porovnáním velikostí kontrolované strojní součásti lze tedy zanedbat. Na povrchu součásti zůstane jen malá prohlubeň v místě odebrání vzorku [1, 4, 20].



Obr. 3 Materiál odebraný mechanickým odbroušením z povrchu vzorku zařízením SSam systém [5]

Celý proces odbroušování díky malé rychlosti do záběru trvá 1 – 2 hodiny. Protože se jedná o jeden souvislý řez vedený jedním směrem, je povrch kovu hladký a souvislý. Na vzorku ani na součásti tedy nejsou žádné ostré okraje a otřepy [1, 20].

Z takto odebraného kusu materiálu lze vyrobit buď 3 až 4 zkušební tělesa pro protlačovací zkoušky na miniaturních discích (obr. 4), nebo jedno těleso pro nestandardizovanou únavovou zkoušku stanovující mez únavy v tahu-tlaku při pokojové teplotě. Těleso pro zkoušku meze únavy má tloušťku 1,2 mm a průměr 15 mm (obr. 5). Disky pro protlačovací zkoušky jsou doporučeny rozměry 8 mm v průměru a tloušťka 0,2 – 0,6 mm (obr. 5). V některých případech jsou pro zkoušky používány také vzorky, jejichž rozměry odpovídají rozměrům vzorků pro transmisní elektronovou mikroskopii, tedy o průměru 3 mm a tloušťce 0,25 mm [1, 9, 22, 23, 24].



Obr. 4 Zkušební tělesa pro protlačovací zkoušky o průměru 8 mm odebrané z povrchu hodnocené součásti [22]



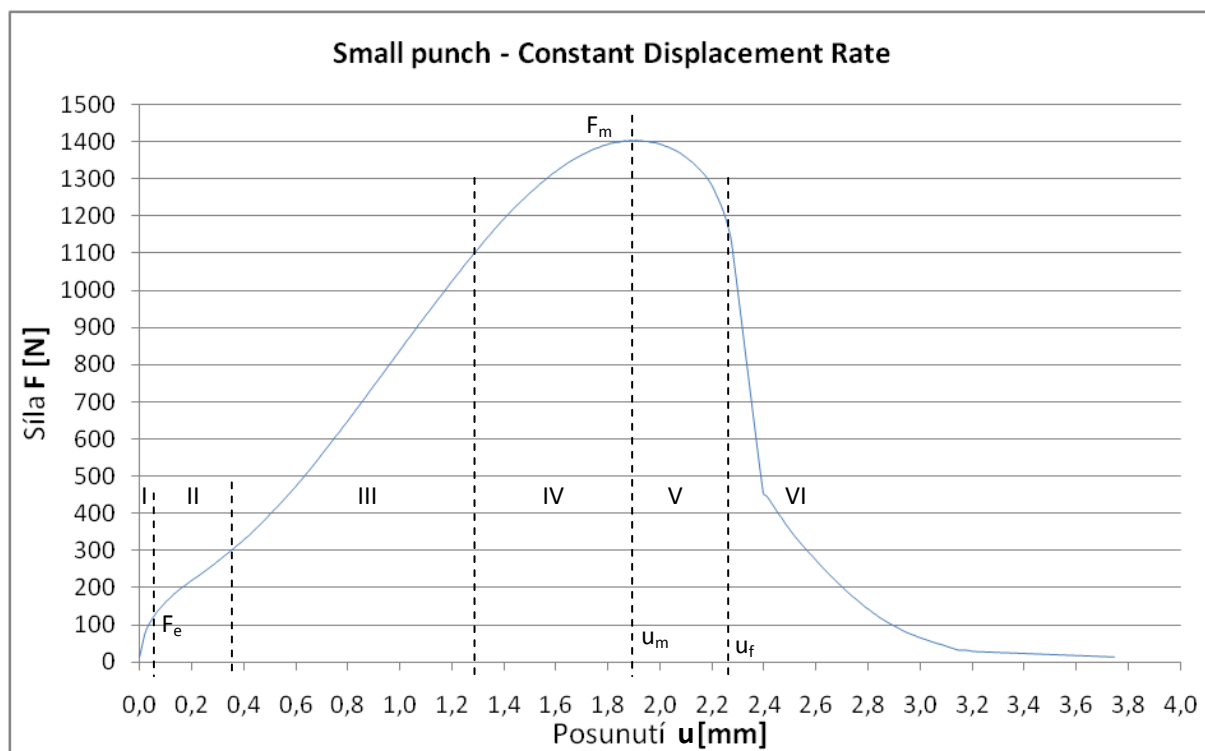
Obr. 5 Srovnání velikostí vzorků pro protlačovací zkoušky na miniaturních discích ($\varnothing$ 8 mm) (vlevo) a pro stanovení meze únavy při laboratorní teplotě ($\varnothing$ 15 mm) (vpravo) [23]

Odebraný materiál lze zároveň využít pro kontrolní chemický rozbor a zjištění strukturního stavu pozorovaného materiálu [7, 23].

Už téměř pět desetiletí je používán odběr vzorků materiálu elektrojiskrovým řezáním, který je založen na selektivním odtavování malých částic materiálu. Tato metoda je například používána pro odběr poměrně velkých vzorků z vnitřní části tlakové nádoby jaderného reaktoru. Obvykle mají takto odebrané vzorky maximální tloušťku 6 mm a maximální délku 30 mm. Mezi pozitiva odbírání vzorků elektrojiskrovým řezáním patří: minimální zbytkové pnutí v součásti vyvolané odběrem materiálu, nízké náklady a snadná obsluha [1, 9, 25].

3.2 Záznam z penetrační zkoušky

Na obr. 6 je příklad záznamu závislosti síly na posunutí z kuličkové penetrační zkoušky manganové oceli na odlitky (ČSN 42 2707). Obecně lze záznam závislosti síla - posunutí rozdělit do několika oblastí (I, II, III, IV, V a VI), které jsou charakteristické odlišnými ději ve vzorku. Toto rozdělení je znázorněno na obr. 6 a popsáno v následujícím textu [1, 12, 26].



Obr. 6 Závislost síla - posunutí manganové oceli na odlitky (ČSN 42 2707) při protlačovací zkoušce na miniaturních discích (small punch test)

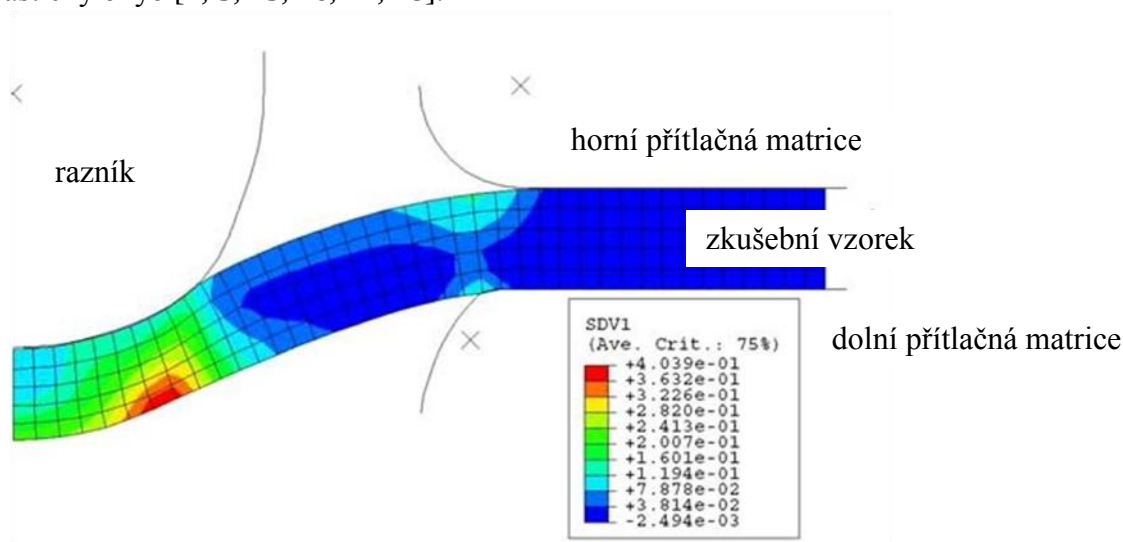
F_e [N]	síla charakterizující přechod z lineární části grafu závislosti síla-posunutí do té části grafu, ve které se ve vzorku rozvíjí zplastizovaná oblast
F_m [N]	maximální síla zaznamenaná během protlačovací zkoušky
u_m [mm]	posunutí odpovídající maximální síle F_m
u_f [mm]	posunutí razníku v okamžiku porušení tělesa; smluvně odpovídá 80% maximální síle F_m

Oblast I

Počáteční lineární oblast s elastickou deformací, která po odtížení vzorku vymizí. Současně s převládající elastickou deformací se během zatěžování vzorku objevuje mikroplastická deformace vzorku v oblasti pod razníkem [1, 3, 15, 26, 27, 28].

Oblast II

Tato oblast sahá od prvního inflexního bodu k druhému a je charakteristická odklonem od linearity vyvolaným rozšiřováním zplastizované oblasti pod razníkem přes celou tloušťku vzorku. Následně se zplastizovaná oblast šíří také radiálně (obr. 7). Oblast II se nazývá plastický ohyb [1, 3, 15, 26, 27, 28].



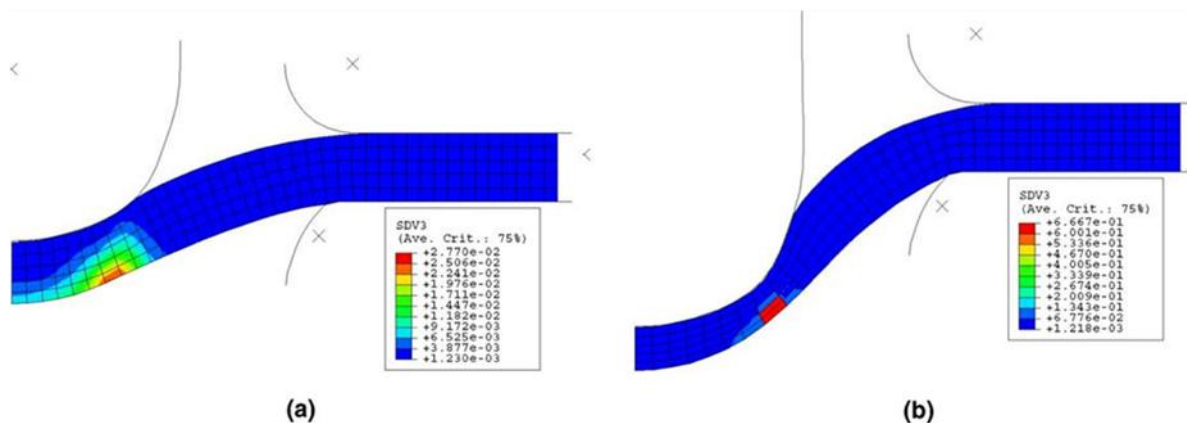
Obr. 7 Model plastické deformace na vzorku při protlačování vytvořený metodou konečných prvků [30]

Oblast III

Vzorek se začíná membránově protahovat a materiál zpevňuje [1, 3, 15, 26, 27, 28].

Oblast IV

Snižuje se sklon křivky závislosti síly na posunutí. Je to vyvoláno počátkem tvorby hrdla a jeho následným růstem. V této oblasti materiál změkčuje a je plasticky nestabilní. Oblast IV končí v bodě, ve kterém je síla maximální. Poškození vzorku se soustřeďuje na ploše vzdálenější od zatěžovacího tělesa (kuličky, příp. razníku). Na obr. 8 je zobrazena simulace chování zatěžovaného vzorku pomocí metody konečných prvků [1, 3, 15, 27, 28, 29, 30].



Obr. 8 Poškození vzorku pro střední zatěžování (a) a po iniciaci lomu (b) [30]

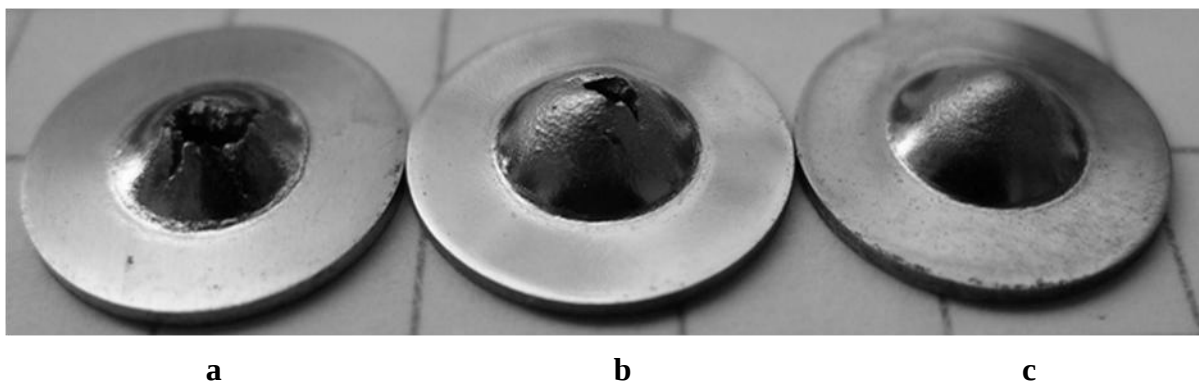
Oblast V

Materiál vzorku stále změkčuje a je plasticky nestabilní. Oblast je ohraničena dvěma výraznými body: maximální a lomovou silou. Maximální síla F_m je spojena s lokálním zužováním a iniciací trhliny. Díky dvojosému stavu napjatosti trhlinka dále roste a na vzorku se tvoří vyboulenina. K lomu dochází buď po obvodu vybouleniny, nebo na jejím vrcholu (obr. 9) [1, 3, 15, 27, 28, 29].

Poloha vzniku trhliny závisí na místě největšího smykového napětí ve vzorku. Při malých průhybech vzorků je největší smykové napětí na vrcholu, při velkých průhybech asi 45° od osy symetrie. Tím je vysvětleno, proč křehké vzorky (např. z kalené oceli) praskají na vrcholu vzorku se současným vznikem několika radiálních trhlin a naopak vzorky z tažných ocelí praskají asi 45° od osy symetrie. V případě tažných ocelí se na vzorku vytváří „klobouček“, který buď odpadne, nebo zůstane na vzorku [31].

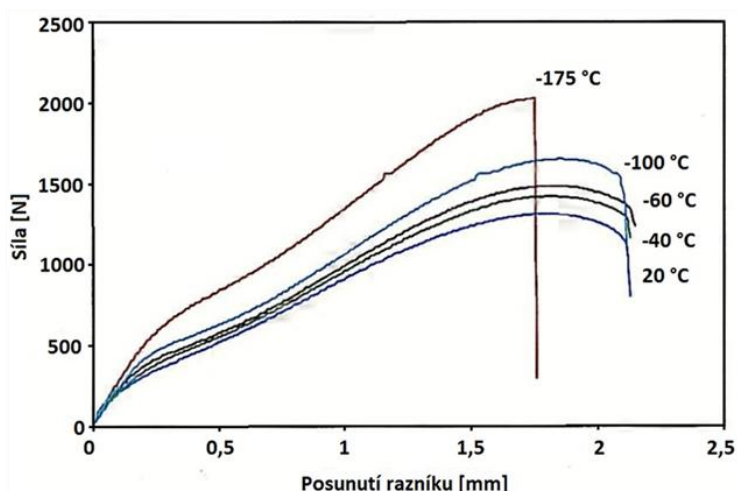
Oblast VI

Zobrazuje sílu, která je potřeba pro vytlačení kuličky z již porušeného tělesa [15, 12].



Obr. 9 a) ocel ČSN 12 060, $d = 1.4 \text{ mm}$
b) ocel ČSN 15 313, $d = 2.0 \text{ mm}$
c) ocel P91, $d = 2.0 \text{ mm}$ [19]

Průběh závislosti síla - posunutí je závislý na teplotě (*obr. 10*). Pro hodnocení výsledků zkoušek jednotlivých vzorků je potřeba provádět zkoušky při stejné teplotě. Rozdíly v hodnotách mechanických vlastností apod. lze využít k vykreslení teplotní závislosti vybrané vlastnosti materiálu na teplotě [1].



Obr. 10 Porovnání rozdílu mezi závislostmi síly a posunutí při různých teplotách [1]

3.3 Hodnocení mechanických vlastností

Ze záznamu zkoušky ve formě závislosti síla - posunutí (obr. 6) a porušeného zkušebního tělesa se stanovují veličiny uvedené níže. Tyto veličiny pak slouží pro výpočet pevnostních charakteristik a lomového chování materiálu [1, 3, 4].

Veličiny stanovené z protlačovací zkoušky [1, 9]:

F_e	[N]	síla charakterizující přechod z lineární části grafu závislosti síla-posunutí do té části grafu, ve které se ve vzorku rozvíjí zplastizovaná oblast
F_m	[N]	maximální síla zaznamenaná během protlačovací zkoušky
u_m	[mm]	posunutí odpovídající maximální síle F_m
u_f	[mm]	posunutí razníku v okamžiku porušení tělesa; smluvně odpovídá 80% F_m
E^{SP}	[J]	lomová energie; odpovídá ploše pod křivkou síla - posunutí od počátku zkoušky do porušení vzorku
ε_f	[-]	efektivní lomová deformace; je závislá na počáteční tloušťce vzorku h_0 a minimální tloušťce porušeného vzorku h_f
T_{SP}	[K]	tranzitní teplota protlačovací zkoušky

Veličiny vypočtené z hodnot stanovených z protlačovací zkoušky [1, 9, 10, 12]:

R_e	[MPa]	výrazná mez kluzu
$R_{p0,2}$	[MPa]	smluvní mez kluzu
R_m	[MPa]	mez pevnosti
A	[-]	tažnost
FATT	[K]	<i>Fracture Appearance Transition Temperature</i> - tranzitní teplota odpovídající 50 % křehkého lomu
J_{IC}	[N/mm]	kritická hodnota J-integrálu; charakterizuje lomovou houževnatost v oblasti elasto-plastické lomové mechaniky
resp.		
K_{IC}	[MPa·m ^{-1/2}]	kritická hodnota faktoru intenzity napětí – lomová houževnatost ve stavu rovinné deformace

Všechny veličiny získané protlačovací zkouškou silně závisí na rozměrech vzorku a funkčních částí zkušebního přípravku. Konkrétně je rozhodující průměr razníku, resp. kuličky d , průměr spodní opěrné matrice D a počáteční tloušťka vzorku h_0 (obr. 1). Vliv těchto rozměrů musí být brán v potaz při výpočtu pevnostních i křehkolomových charakteristik zkoušeného materiálu [1].

3.3.1 Stanovení výsledků protlačovací zkoušky

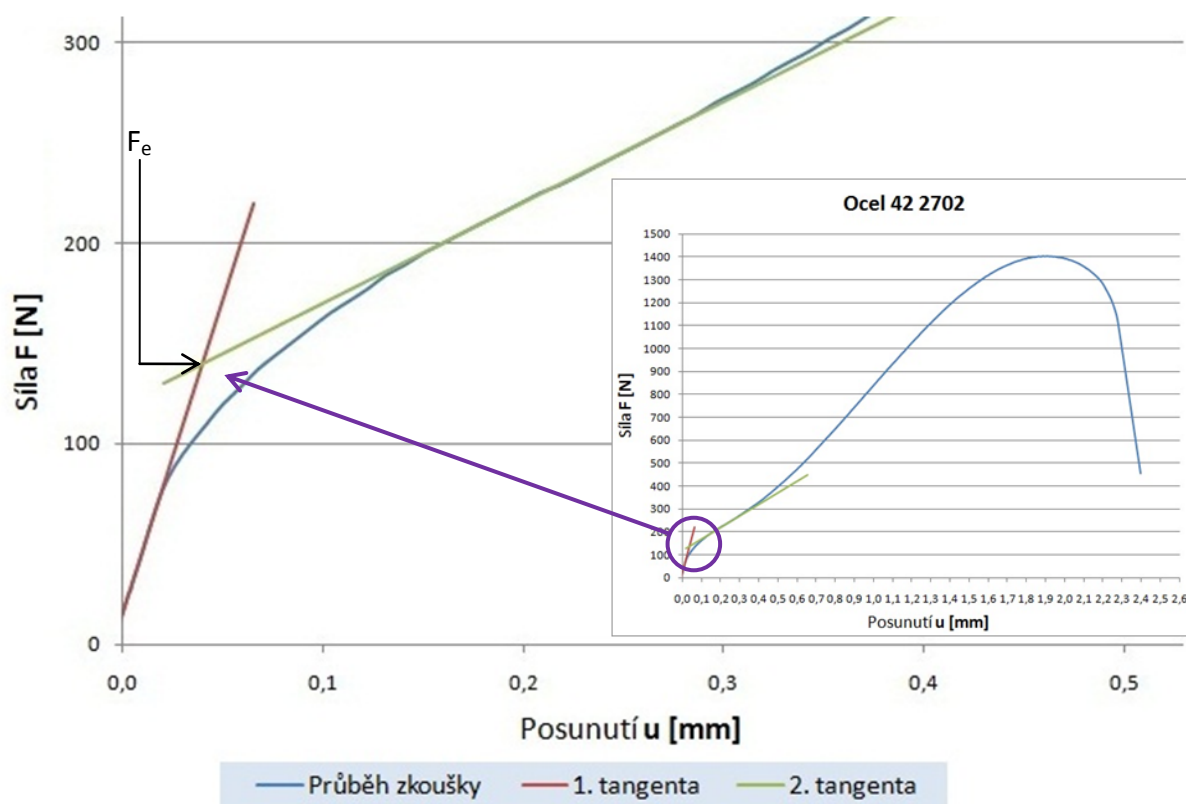
Síla F_m se určuje jako maximální síla na záznamu síla - posunutí. Ke stanovení síly F_e se používá metoda dvou tečen (někdy označovaná jako metoda dvou tangent) a metoda smluvního posunu sklonu lineární části zatěžovacího diagramu (offset). Metoda dvou tečen určuje sílu F_e jako průnik tečny vedené v oblasti I na obr. 6 a tečny vedené v oblasti II na obr. 6. Druhá metoda určuje sílu F_e smluvně na základě posunu tečny vedené v oblasti I na obr. 6 ve směru osy úseček v grafu síla-posunutí [12, 32].

Určení F_e metodou dvou tečen

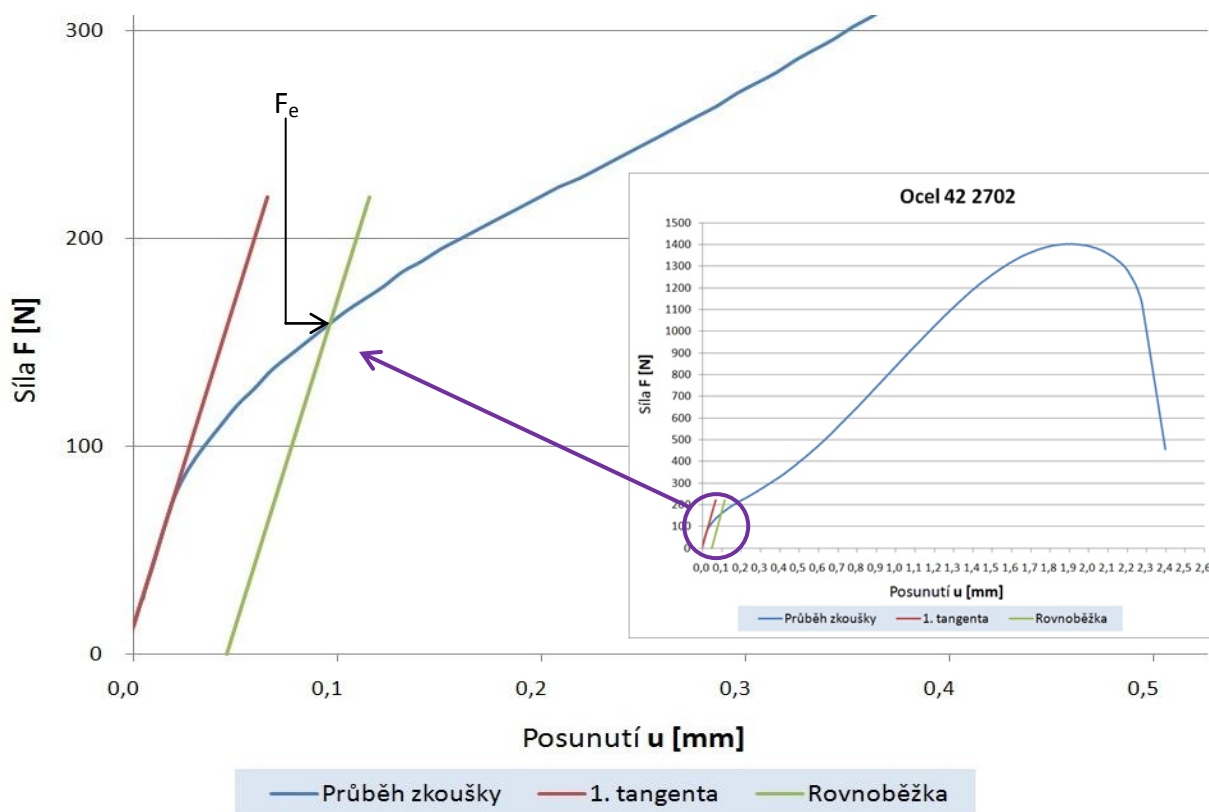
Při vyhodnocování protlačovací zkoušky touto metodou se do grafu závislosti síla - posunutí vynesou dvě přímky (obr. 11). První přímka kopíruje lineární část grafu, při které v materiálu probíhá pouze elastická deformace. Druhá přímka leží na lineární části grafu v oblasti II. V místě protnutí těchto přímek leží síla F_e [1, 4, 9, 12, 33].

Smluvní určení F_e

Stanovení síly F_e smluvní metodou spočívá ve vytvoření rovnoběžky s přímkou, která kopíruje lineární část grafu v elastické oblasti (obr. 12). Rovnoběžka je ve vzdálenosti $\frac{1}{10}$ počáteční tloušťky vzorku h_0 . Sílu F_e odečteme v místě, kde rovnoběžka s počáteční lineární částí grafu protne křivku závislosti síla - posunutí. Hodnota posunu rovnoběžky s lineární částí závislosti síla - posunutí byla určena experimentálně [12].



Obr. 11 Stanovení síly F_e z protlačovací zkoušky pomocí metody dvou tečen



Obr. 12 Stanovení síly F_e z protlačovací zkoušky smluvní metodou

3.3.2 Stanovení pevnostních charakteristik

Pevnostní charakteristiky materiálu lze určit několika způsoby. A to buď z empiricky stanovených vztahů, nebo pomocí matematických modelů využívajících metody konečných prvků nebo metody neuronových sítí [1, 12].

Hodnocení meze kluzu a meze pevnosti pomocí empiricky stanovených korelací

Poprvé se rovnice pro výpočet meze kluzu R_e ($R_{p0.2}$) a meze pevnosti R_m z výsledků protlačovacích zkoušek objevily v roce 1987 v článku na téma vývoje miniaturních vzorků pro protlačovací zkoušky ze vzorků pro transmisní elektronovou mikroskopii (*Development of a further-miniaturized specimen of 3 mm diameter for TEM disk (ϕ 3 mm) small punch tests* [34]) japonských autorů Maa a Takahashiho. V literatuře se poté objevilo ještě několik vztahů pro výpočet meze kluzu a meze pevnosti. Nejvíce se však osvědčily právě tyto vztahy. Jsou uvedeny jako rovnice 1, 2 [1, 9, 12, 26]:

$$R_e (R_{p0.2}) = 360 \cdot \frac{F_e}{h_0^2}, \quad (1)$$

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

Výsledkům konvenční tahové zkoušky poměrně dobře odpovídají také vztahy čínských autorů Guana a Wanga (rovnice 3, 4) [33].

$$R_e (R_{p0.2}) = 0,4847 \cdot \frac{F_e}{h_0^2} + 21,359 \quad (3)$$

$$R_m = 0,0666 \cdot \frac{F_m}{h_0^2} + 146,03 \quad (4)$$

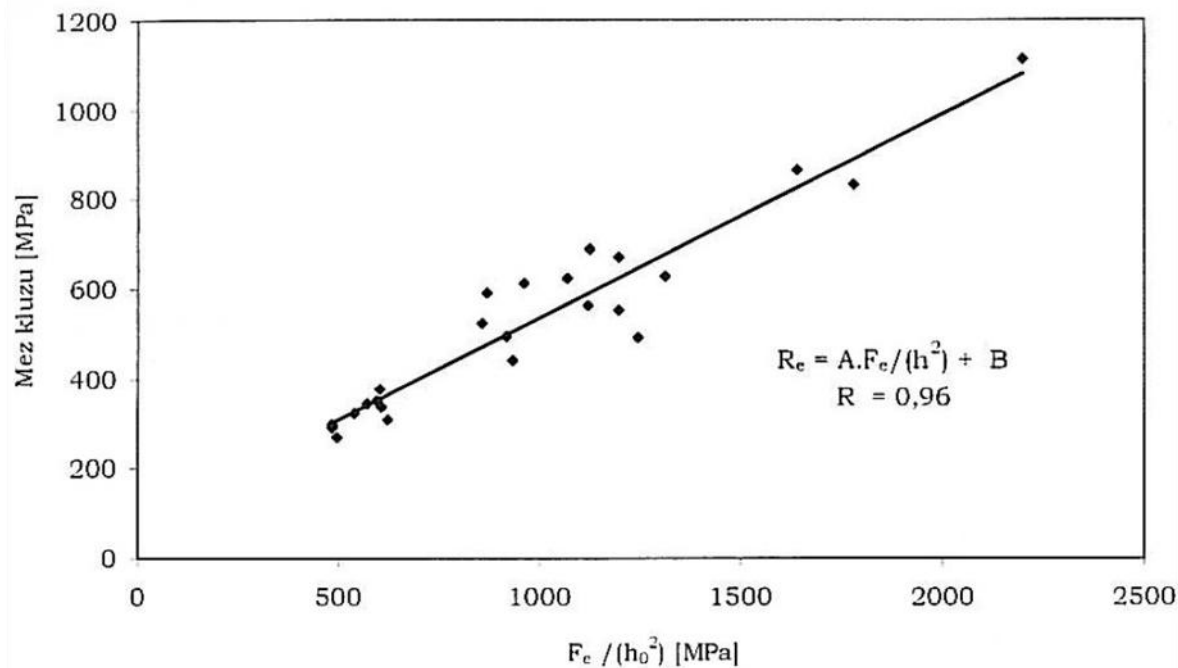
Ze získaných hodnot lze vytvořit grafy závislosti napětí (získaného konvenční tahovou zkouškou) na síle (z grafu síla - posunutí protlačovací zkoušky) a počáteční tloušťce vzorku protlačovací zkoušky. Nevýhodou však je, že tyto závislosti jsou platné pouze pro daný typ zařízení a jeho vlastnosti a počáteční tloušťku vzorku. Důvodem je silná závislost sil F_e a F_m a posunutí při maximální síle u_m na vlastnostech zkušebního stroje [1].

Grafy na *obr. 13 a 14* zobrazují korelační závislosti meze kluzu a meze pevnosti, které byly stanoveny pro zkušební stroj společnosti Materiálový a metalurgický výzkum s.r.o. v Ostravě. Pro experimenty byla použita ocel 15 128 [1].

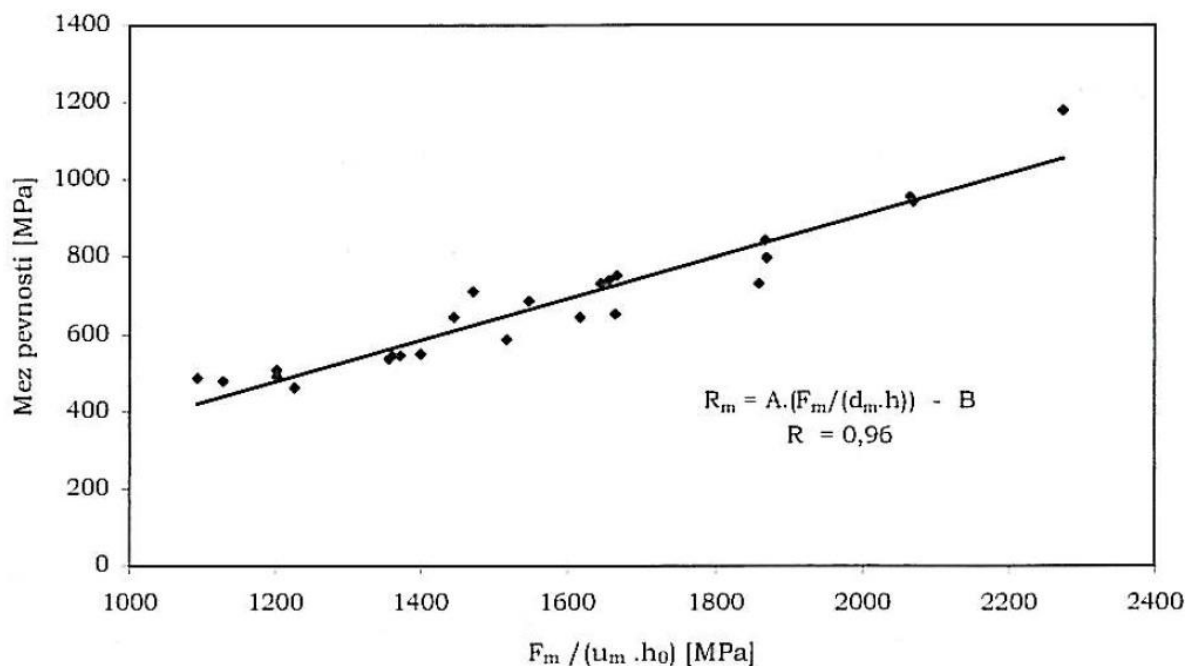
Hodnocení meze kluzu a meze pevnosti pomocí matematických modelů

Mechanické vlastnosti jako jsou mez kluzu a mez pevnosti lze vyhodnotit také pomocí matematického modelování. Mezi vhodné metody vyhodnocování patří např. metoda konečných prvků (MKP) a metoda neuronových sítí. Tento způsob je založen na numerické simulaci závislosti skutečného napětí σ a skutečné deformace $\bar{\epsilon}$ získané konvenční tahovou zkouškou a závislosti síly F a posunutí u získané protlačovací zkouškou na miniaturních discích. Simulace následně slouží jako vzory pro metodu neuronových sítí. Kombinace metod konečných prvků a neuronových sítí dokáže velmi zkrátit čas vyhodnocování. [1, 9, 12].

Příklady MKP výpočtu chování vzorku v průběhu protlačovací zkoušky byly uvedeny na *obr. 7 a 8*.



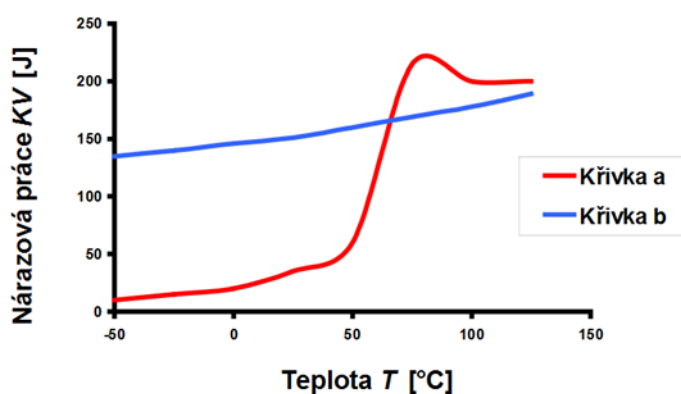
Obr. 13 Korelační závislost meze kluzu R_e (získané konvenční tahovou zkouškou) na síle F_e (stanovené na základě výsledků protlačovací zkoušky) oceli 15 128 [1]



Obr. 14 Korelační závislost meze pevnosti R_m (získané konvenční tahovou zkouškou) na síle F_m (stanovené na základě výsledků protlačovací zkoušky) oceli 15 128 [1]

3.3.3 Stanovení tranzitní teploty

Ve strojírenské praxi se používá několik tranzitních teplot. Obvykle jsou stanovovány zkouškou rázem v ohybu [35] na zkušebních tělesech s V, příp. s U vrubem. Tranzitní chování kovů spočívá v přechodu od tvárného ke křehkému lomu s poklesem teploty. Z běžně používaných kovových materiálů jej vykazují kovy s BCC mřížkou, nevyskytuje se u kovů s FCC mřížkou (obr. 15) [1, 21, 22, 36].



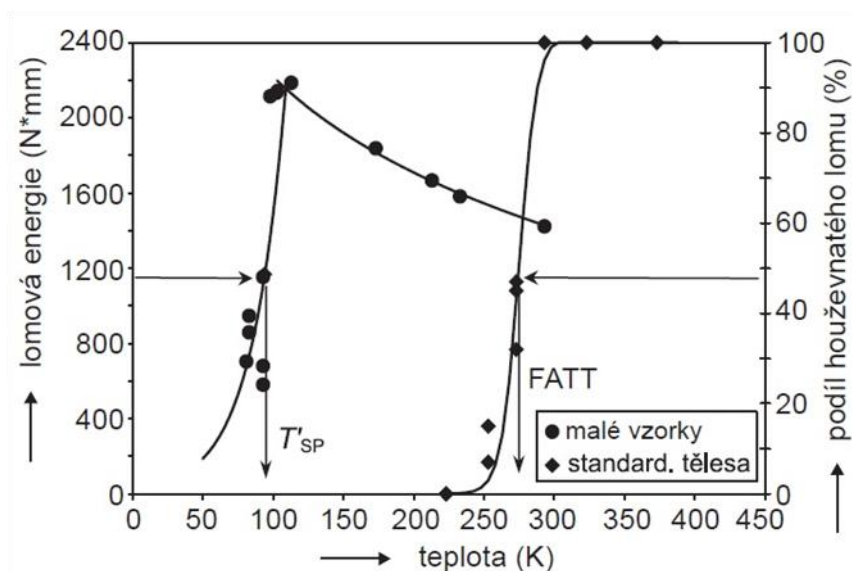
Obr. 15 Obecná závislost nárazové práce KV na teplotě T pro materiály s BCC mřížkou (křivka a) a materiály s FCC mřížkou (křivka b) [36]

Mezi používané tranzitní teploty patří např. [1, 36]:

FATT	teplota odpovídající 50 % křehkého lomu
t_{27J}	teplota odpovídající nárazové práci $KV = 27 J$,
t_{41J}	teplota odpovídající nárazové práci $KV = 41 J$,
t_{50J}	teplota odpovídající nárazové práci $KV = 50 J$,
$t_{50\%}$	teplota, při které je 50 % tvárného lomu na lomové ploše zkušebního tělesa.

Pomocí protlačovací zkoušky na miniaturních discích se určuje tranzitní teplota T_{SP} , která odpovídá polovině součtu nejvyšší a nejnižší lomové energie v tranzitní oblasti (plocha pod křivkou závislosti síla - posunutí) stanovená z experimentálně naměřených dat metodou nejmenších čtverců. Pro stanovení tranzitní teploty T_{SP} by měly být provedeny zkoušky na sérii vzorků (nejméně 7) v teplotním rozmezí od $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1, 9, 21, 22, 37, 38].

Na obr. 16 je porovnání tranzitní teploty, podílu houževnatého lomu a teplotní závislosti lomové energie pro protlačovací zkoušku na miniaturních discích a zkoušku rázem v ohybu na vzorcích z oceli na bázi CrMoV. Lze jasně vidět, že tranzitní teplota vyhodnocená na miniaturních vzorcích je výrazně nižší než tranzitní teplota získaná standardní zkouškou rázem v ohybu [22].



Obr. 16 Porovnání tranzitní teploty T_{SP} vyhodnocené při protlačovací zkoušce a FATT vyhodnocené při zkoušce rázem v ohybu pro ocel typu CrMoV [22]

Mezi teplotou T_{SP} zjištěnou protlačovací zkouškou a teplotou FATT zjištěnou zkouškou rázem v ohybu pro tělesa s V vrubem bylo stanoveno několik výpočtových vztahů (rovnice 5 – 7) [22, 38, 39, 40]:

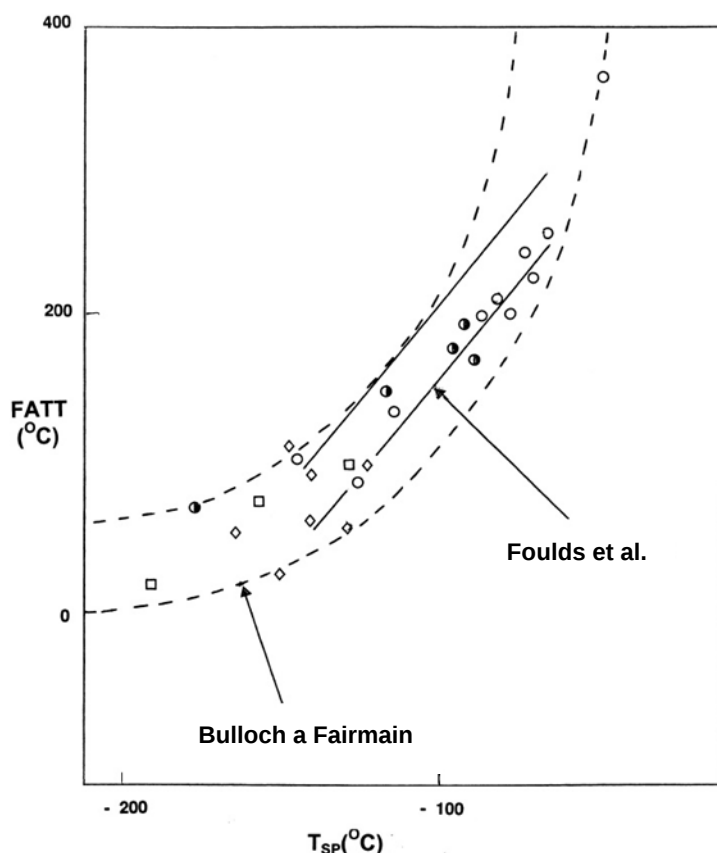
$$FATT = a \cdot T_{SP}, \quad (5)$$

kde $\alpha = 0,35 - 0,44$,

$$FATT = a \cdot T_{SP} + \beta, \quad (6)$$

$$FATT = \frac{C}{(T_{SP})^2}. \quad (7)$$

Na obr. 17 je zobrazena závislost teplot FATT a T_{SP} pro ocel na bázi CrMoV. Je zřejmé, že tato závislost je lineární pouze v určitém teplotním intervalu. Pro popis většího teplotního rozsahu je potřeba použít jiný vzorec, např. rovnice 9. Při vykreslování závislosti teplot FATT a T_{SP} neleží jednotlivé body na jediné křivce, ale v pásu. [1, 4, 9, 22, 37, 38, 41, 39].

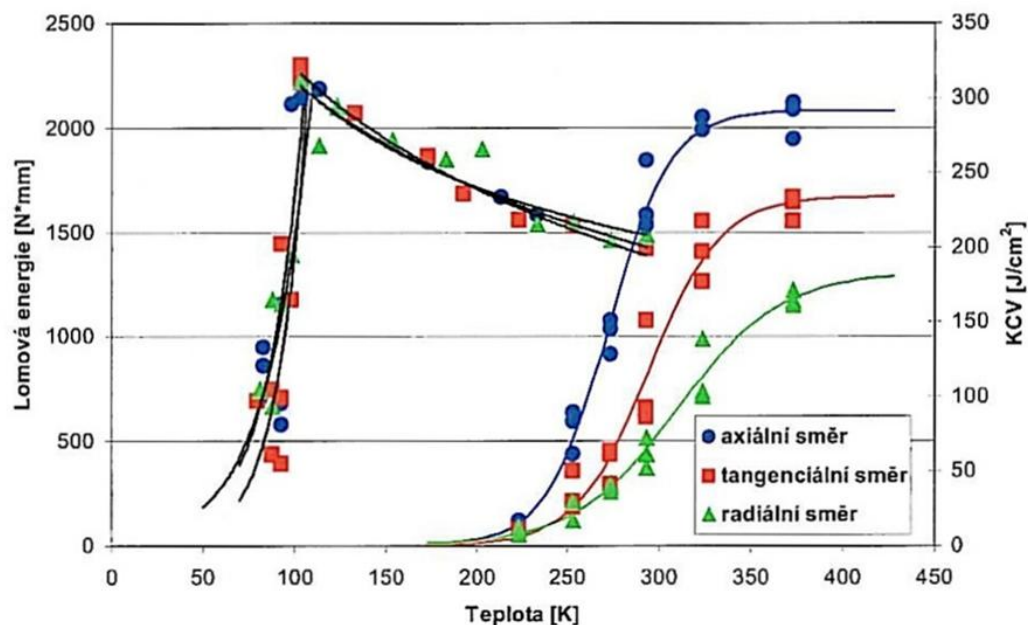


Obr. 17 Závislost teplot FATT a T_{SP} rotorové oceli na bázi CrMoV [37]

U standardních zkoušek pro stanovení tranzitní teploty, nárazové práce i vrubové houževnatosti byla pozorována silná závislost na orientaci zkušebního tělesa se směrovou strukturou. Např. u tvářených výrobků je nejvyšší hodnota nárazové práce při zkoušení těles orientovaných rovnoběžně se směrem tváření a nejnižší hodnota při orientaci kolmo k povrchu výrobku [1, 4].

Není však známo, jak se mění tranzitní teplota T_{SP} v závislosti na orientaci zkušebního tělesa se směrovou strukturou. Prof. Karel Matocha prováděl srovnávací testy na oceli 15 128 a zjistil, že teplotní závislosti stanovené protlačovacími zkouškami na orientaci zkušebního tělesa nezávisí (obr. 18). Korejská dvojice Young Wha Ma a Kee Bong Yoon prováděla obdobné zkoušky na transversálně izotropní hliníkové slitině 2024 vyrobené bezkontrakčním protlačováním (ECAP – Equal Channel Angular Pressing). Na tomto materiálu naopak závislost pozorována byla (tabulka. 1). Schematický náčrtek systému odebrání vzorků pro protlačování je na obr. 19 [1, 26].

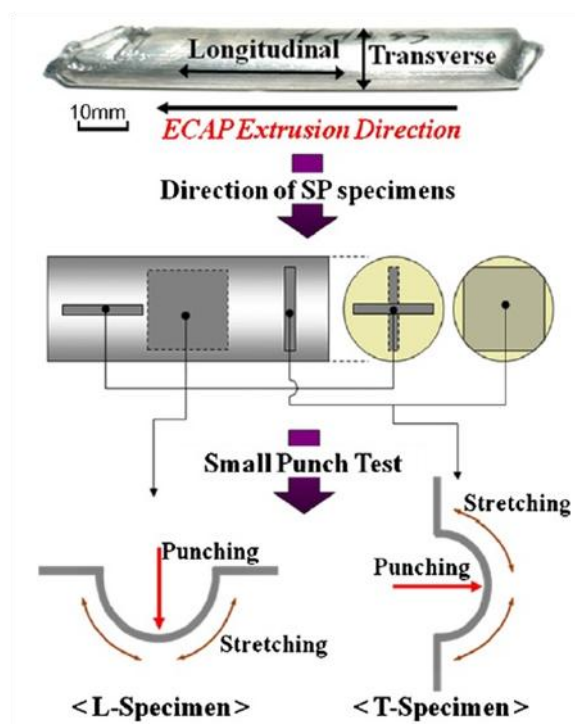
Nedostatek informací o existující či neexistující závislosti lomové energie na orientaci zkušebního vzorku při protlačovacích zkouškách způsobuje problém. Vzorky materiálu odebírané přímo ze zkoumané součásti zařízením pro povrchový odběr vzorků lze odebrat pouze rovnoběžně s povrchem a není jasné, ke které orientaci standardizovaných zkušebních těles pro zkoušku rázem v ohybu lze výsledky ze zkoušek miniaturních vzorků vztahovat [1].



Obr. 18 Porovnání vlivu orientace zkušebního tělesa na lomovou energii při zkoušení na miniaturních vzorcích (vlevo) a standardních vzorcích typu Charpy (vpravo) [1]

Tabulka. 1 Srovnání výsledků tahové zkoušky a protlačovacích zkoušek při různé orientaci vzorků transversálně izotropní hliníkové slitiny 2024 [22].

	Tensile test ^a	Small punch test		
	Longitudinal (measured) ^b	Biaxial (L-specimen) ^b	Longitudinal (predicted) ^b	Transverse (T-specimen) ^b
$\sigma_{f,max}$ (MPa)	488	462	464	454



Obr. 19 Systém odebrání vzorků pro protlačovací zkoušky na miniaturních vzorcích z bezkontrakčně protlačované slitiny Al 2024 (Ma, Yoon) [26]

3.3.4 Stanovení lomové houževnatosti na hladkých vzorcích

Z protlačovací zkoušky na miniaturních discích lze získat hodnoty lomové houževnatosti materiálu J_{IC} , resp. K_{IC} třemi způsoby. Dva z těchto způsobů jsou založeny na empirických korelacích, třetí je čistě analytický. Mezi empirické způsoby patří dvoustupňová metoda stanovení K_{IC} a přímý odhad lomové houževnatosti z výsledků penetračních testů. Analytický způsob byl navržen pro výzkumný institut EPRI společností FAA. Spočívá v analýze výsledků protlačovací zkoušky a stanovení hustoty deformační energie potřebné pro iniciaci porušení vzorku. Tento způsob vyžaduje předchozí znalost mechanických vlastností materiálu [1, 9, 22, 41].

Dvoustupňová metoda stanovení K_{IC}

Odvození lomové houževnatosti je založeno na [1, 9]:

- vztahu mezi teplotami T_{SP} a $FATT$,
- vztahu mezi teplotou $FATT$ a lomovou houževnatostí K_{IC} .

Přímý odhad lomové houževnatosti z výsledků penetračních testů

Pro křehké materiály platí rovnice 8 [9]:

$$K_{IC} = C \cdot [\sigma_f^{SP}]^{2/3}, \quad (8)$$

kde C je empiricky stanovená konstanta,
 σ_f^{SP} [MPa] je napětí v okamžiku porušení vzorku u protlačovací zkoušky

Pro houževnaté materiály, jejichž chování lze popsat parametry elastoplastické lomové mechaniky, platí rovnice 9 [1, 9, 22, 24, 42, 43]:

$$J_{IC} = k \cdot \varepsilon_f - J_0 \quad (9)$$

kde k a J_0 jsou empiricky stanovené konstanty,
 ε_f je efektivní lomová deformace závislá na počáteční tloušťce vzorku h_0 a minimální tloušťce porušeného vzorku h_f , lze ji vypočítat podle rovnice 10

$$\varepsilon_f = \ln \frac{h_0}{h_f} \quad (10)$$

EPRI-FAA „inovovaný přístup“

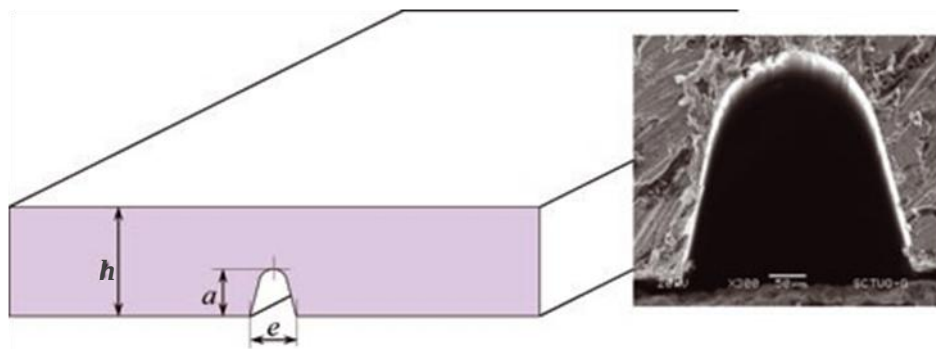
Postup vyhodnocování lomové houževnatosti tímto způsobem je následující [1, 9]:

- sledování křivky síla - posunutí se současným pozorováním povrchu zkušebního tělesa pro určení počátku vzniku trhliny,
- stanovení závislosti skutečné napětí σ - skutečná deformace ε ze záznamu křivky síla - posunutí,
- vyhodnocení hustoty deformační energie nutné pro iniciaci trhliny,
- odhad síly odpovídající kritické hustotě deformační energie na čele trhliny u standardního tělesa pro zkoušku rázem v ohybu. Stanovení velikosti lomové houževnatosti J_{IC} z odhadu této síly.

Tento způsob určování lomové houževnatosti je vhodný také pro numerické simulace metodou konečných prvků [1].

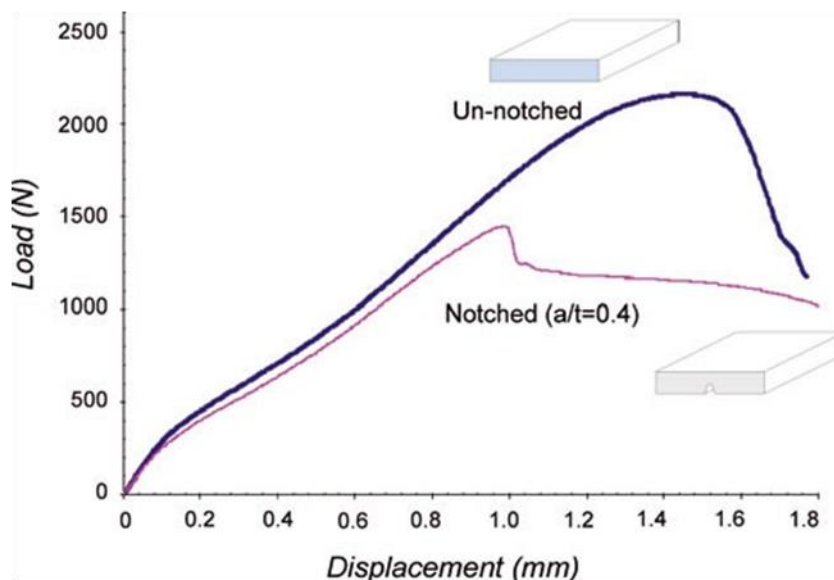
3.3.5 Stanovení lomové houževnatosti na vzorcích se zářezem

Hodnotit lomovou houževnatost lze také pomocí vzorků s drobným podélným zářezem na povrchu (obr. 20). Zářez může a nemusí být po celé délce vzorku. Vzorky jsou obvykle čtvercového průřezu s délkou strany 10 mm a tloušťce 0,5 mm. Poměr hloubky zářezu a tloušťky vzorku a/h by se měl pohybovat v rozmezí 0,3 – 0,4. Přesná geometrie zářezu je stále předmětem experimentů. Od zkoušek na takto upravených vzorcích jsou očekávány přesnější výsledky [44, 45, 46].



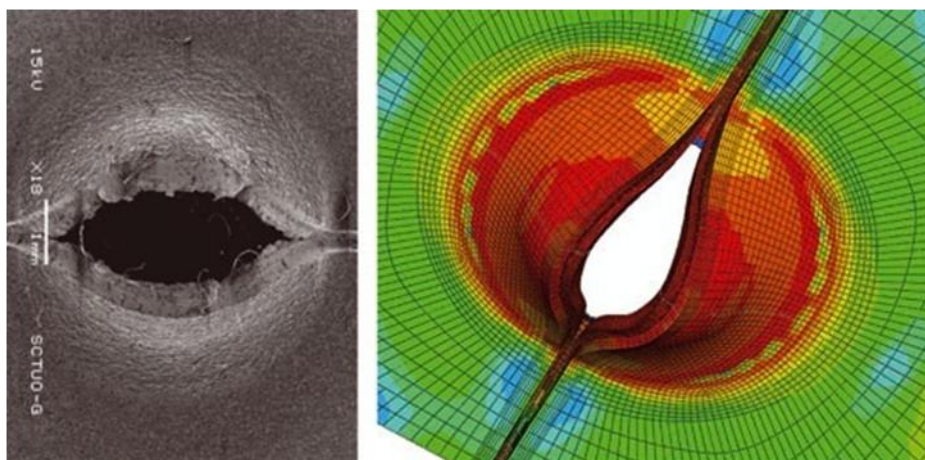
Obr. 20 Schematický náčrt vzorku se zářezem a detail zářezu na reálném vzorku [44]

Hlavní rozdíl při hodnocení lomové houževnatosti vzorků se zářezem je v chování zatěžovaných vzorků. Při zatěžování těchto vzorků se začíná trhlina šířit ještě před dosažením maximální hodnoty zatěžovací síly. U hladkých vzorků je nejprve dosažena maximální síla a poté vznikne trhlina, která se dále šíří. Liší se i maximální dosažená síla při zatěžování obou typů vzorků (obr. 21). Vyhodnocování lomové houževnatosti K_{IC} , resp. J_{IC} na vzorcích se zářezem je založeno na numerické simulaci zatěžování [44, 45, 46].



Obr. 21 Porovnání křivek síla - posunutí pro hladký vzorek (Un-notched) a vzorek se zářezem (Notched) uhlíkové oceli [44]

Na obr. 22 je fotografie porušeného vzorku uhlíkové oceli a simulace porušení vzorku vytvořená metodou konečných prvků.



Obr. 22 Porušení vzorku se zářezem uhlíkové oceli – realita (vlevo) a simulace (vpravo) [44]

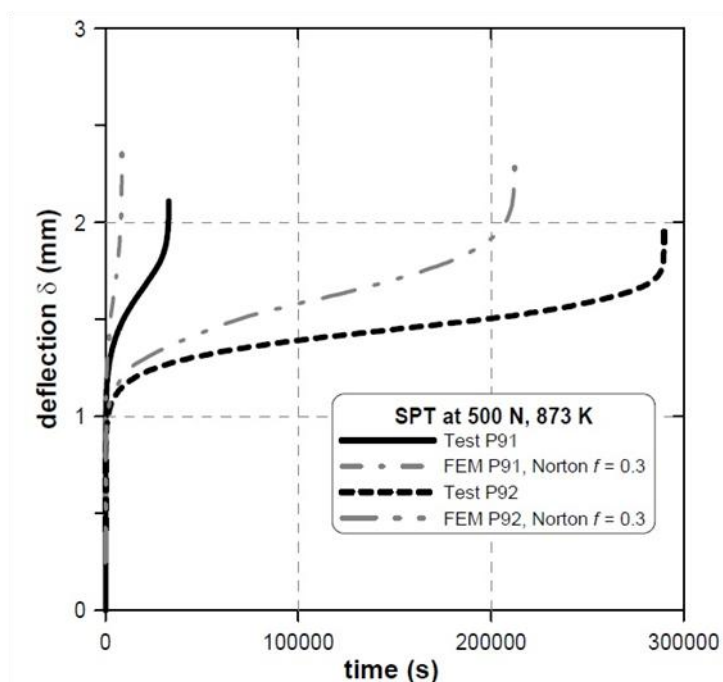
3.4 Protlačovací zkoušky na miniaturních discích za zvýšených teplot

Protlačovací zkoušky na miniaturních discích za zvýšených teplot (nad 400 °C), při kterých se uplatňuje creep, se řídí doporučením CWA 15627 částí A: Kodex provádění creepových protlačovacích zkoušek na miniaturních discích. Tyto zkoušky jsou časově závislé [1, 9].

Postup provádění zkoušek je shodný s postupem při provádění zkoušek za teplot nižších než 400 °C. Vzorek však musí být obklopen inertní ochrannou atmosférou, která zabrání jeho oxidaci. Jako ochranná atmosféra může být použit např. argon [1, 9, 19, 31].

Během zkoušky je aplikováno konstantní zatížení vzorku a zaznamenávána závislost posunutí - čas (křivka tečení). Hodnocena je doba do porušení vzorku. Ze záznamu lze určit také rychlost creepu miniaturního vzorku v mm/s a následně také vzájemný vztah mezi rychlostí creepu miniaturního vzorku a rychlostí sekundárního creepu standardního vzorku. Tento vztah je spíše numerické povahy, proto existují snahy tento vztah vytvořit pomocí numerické simulace. Na obr. 23 jsou zobrazeny creepové křivky ocelí P91 a P92 získané při konstantní teplotě 500 °C a konstantním zatížení 500 N [1, 9, 31].

Další creepové charakteristiky, jako jsou např. mez pevnosti při tečení R_{TP} , mez tečení R_T nebo výchozí napětí R_R a zbytkové napětí R_{RZ} relaxace, je však obtížné získat. Pro jejich vyhodnocení je totiž potřeba získat závislost napětí - čas, která není přímým výstupem protlačovací zkoušky. [1, 9, 47].



Obr. 23 Závislosti posunutí (deflection) - čas (time) ocelí P91 a P92 získané při creepové protlačovací zkoušce na miniaturních discích při konstantním zatížení 500 N a konstantní teplotě 500 °C. V grafu je zobrazeno také porovnání křivek ze zkoušek (černá barva) a ze simulace MKP (šedá barva) [31]

Pro porovnání creepových zkoušek na miniaturních vzorcích a standardních vzorcích je třeba dosáhnout stejné doby do lomu obou typů zkušebních těles. Proto je potřeba určit zatěžovací sílu protlačovací zkoušky. K tomuto účelu bylo vytvořeno několik vztahů (rovnice 11 – 14) [1, 9].

Bicego, Lucon, Crudeli:

$$\frac{F}{\sigma} = \left[2\pi h \cdot \left(r + \frac{h}{2} \right) \cdot \sin \theta_0 \right] \cdot \sin \theta_0 \quad (11)$$

kde θ_0 je poloviční úhel kontaktu razníku s deformovaným vzorkem (viz obr. 24).

Dobeš, Milička:

$$\frac{F}{\sigma} = \frac{2\pi h \cdot \sin \theta_0 \cdot \tan \theta_0}{(1 + \tan^2 \theta_0)^{\frac{1}{2}}} \quad (12)$$

Tettamanti, Crudeli:

$$\frac{F}{\sigma} = K \left[2\pi h r \cdot \left(\frac{D}{2r} - \chi \right) \right] \quad (13)$$

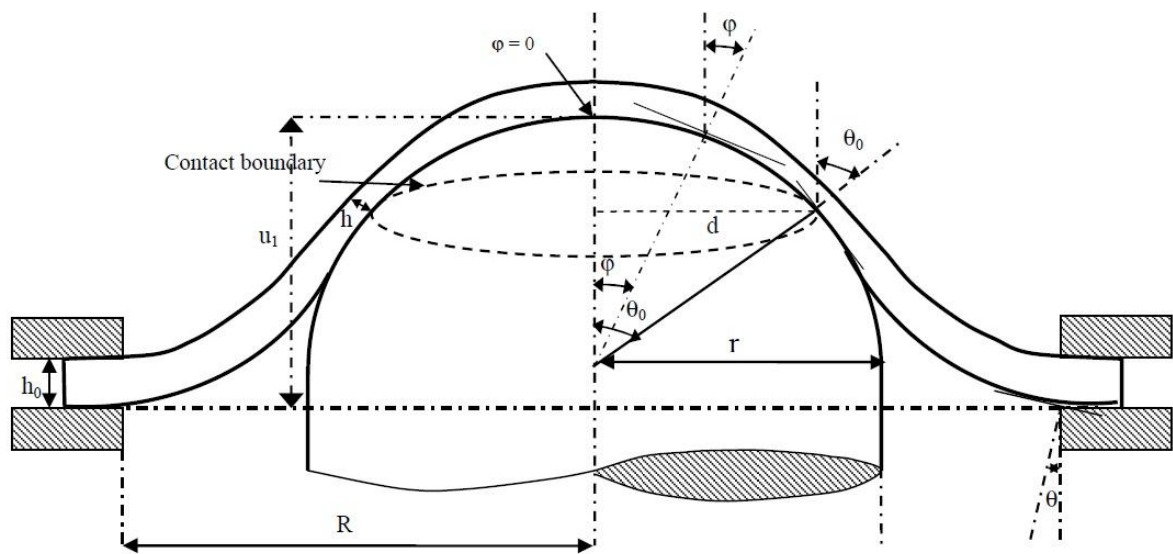
kde K je koeficient závislý na typu penetračního testu ($K > 0,6 \sim 0,7$ pro kuličkový „bulge“ test),
 χ je koeficient tření ($\chi = 0,6 \sim 0,7$ v závislosti na teplotě a zatěžovací síle).

Chakrabarty:

$$\frac{F}{\sigma} = 2\pi hr \cdot \sin^2 \theta_0 \quad (14)$$

kde h je tloušťka vzorku v místě kontaktu s razníkem, resp. kuličkou a lze ji vypočítat podle rovnice 15,

$$h = h_0 \cdot \left(\frac{1 + \cos \theta_0}{1 + \cos \theta} \right)^2. \quad (15)$$



Obr. 24 Schéma průběhu creepového penetračního testu

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4.1 Experimentální materiál

4.1.1 Ocel P91

Oceli P91 odpovídá v českém systému označování ocel 17 116, jejíž norma byla v roce 2003 bez náhrady zrušena. V evropském systému značení je to ocel X10CrMoVNb9-1 (1.4903) a v americkém A 335. Chemické složení je v *tabulkách* 2. a 3 [48, 49].

Tabulka 2 Chemické složení oceli P91 dle normy [48].

Prvek		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb	V	N	Al
obsah	min	0,08	-	0,30	-	-	8,00	-	0,85	0,06	0,18	0,030	-
[hm. %]	max	0,12	0,50	0,60	0,025	0,015	9,50	0,40	1,05	0,10	0,25	0,070	0,040

Tabulka 3 Chemické složení vzorku oceli P91.

Prvek	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb	V	N	Al
obsah	0,100	0,400	0,420	0,013	0,006	8,300	0,130	0,900	0,090	0,250	0,030	0,012
[hm. %]												

Mez kluzu R_{eH} nebo $R_{p0,2}$ oceli P91 je dle normy minimálně 450 MPa, mez pevnosti R_m se má pohybovat v rozmezí 630 – 730 MPa. Tvrdost normou není dána. Na vzorku materiálu byla měřena na několika místech zkouškou tvrdosti podle Vickerse, výsledky tohoto měření jsou v *tabulce* 4 [48].

Tabulka 4 Tvrdost oceli P91 měřená za pokojové teploty.

tvrdost	hodnota tvrdosti [-]				
HV10	221	219	218	218	220
HV1	218,6	223,9	218,6		

Tato ocel je vhodná pro svařované součásti tlakových nádob, které pracují za zvýšených teplot (550 – 650 °C). Je určena na výkovky pro tlakové nádoby se stanovenými vlastnostmi (mez kluzu $R_{p0,2}$) při zvýšených teplotách. Hodnoty meze kluzu při zvýšených teplotách dané normou jsou v *tabulce* 5 [48].

Tabulka 5 Hodnoty meze kluzu při zvýšených teplotách dle normy [48].

Teplota [°C]	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
$R_{p0,2}$ [MPa]	410	395	380	370	360	350	340	320	300	270	215

Nejčastěji se využívá pro výrobu těles, vík a uzavíracích prvků průmyslových armatur a parního potrubí. Je vhodná také pro součásti chemických zařízení v prostředí s vysokou koncentrací sirovodíku. Vyrábí se z ní, mimo jiné, trubky používané v jaderné energetice. Tepelně se zpracovává buď normalizačním žíháním (1040 – 1090 °C/vzduch), nebo popouštěním (730 – 780 °C/vzduch) [48, 49, 50].

4.1.2 Ocel 10Ch2MFA

Ocel 10Ch2MFA byla vyvinuta z oceli A 508 tř.2 (chemické složení v je v *tabulce 6*), chemické složení této oceli se nejvíce podobá oceli 15Ch2MFA (*tabulka 7*). Pro ocel 10Ch2MFA neexistuje český, evropský ani americký ekvivalent. Chemické složení vzorku oceli 10Ch2MFA je v *tabulce 8*, tvrdost v *tabulce 9* [51].

Tabulka 6 Chemické složení oceli A 508 tř.2 dle normy [51].

Prvek		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V
obsah [hm. %]	min	-	0,15	1,15	0,25	0,50	0,55	-
	max	0,27	0,30	1,50	0,45	0,90	0,70	0,05

Tabulka 7 Chemické složení oceli 15Ch2MFA dle normy [51].

Prvek		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V
obsah [hm. %]	min	-	0,17	0,30	2,5	-	0,60	0,25
	max	0,18	0,37	0,60	3,0	0,40	0,80	0,35

Tabulka 8 Chemické složení vzorku oceli 10Ch2MFA.

Prvek	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Co	Sn	P	S
obsah [hm. %]	0,120	0,230	0,420	2,810	0,130	0,620	0,310	0,110	0,010	0,010	0,010	0,017

Pevnostní charakteristiky oceli 15Ch2MFA odpovídají hodnotám 539 – 735 MPa pro mez pevnosti R_m a 431 MPa pro mez kluzu R_e [51].

Tabulka 9 Tvrdost oceli 10Ch2MFA měřená za pokojové teploty.

tvrdost	hodnota tvrdosti [-]				
HV10	202	197	204	201	201
HV1	203,1	201	197,5		

Tyto oceli byly vyvinuty pro tlakové nádoby tlakovodních jaderných reaktorů. Důraz byl kladen na odolnost proti křehkému porušení při působení radiace, svařitelnost a vysokou mikročistotu [51].

4.1.3 Ocel 20CrNi2MoV

Ocel 20CrNi2MoV je vývojová ocel Škody výzkum, proto její norma není dostupná. Naměřenému chemickému složení vzorku oceli 20CrNi2MoV (*tab. 10*) se nejvíce blíží chemické složení oceli 25Cr2Ni2MoV (*tab. 11*). Tvrdost vzorku z oceli 20CrNi2MoV je v *tab. 12*.

Tabulka 10 Chemické složení vzorku oceli 20CrNi2MoV.

Prvek	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu
obsah [hm. %]	0,250	0,220	0,440	0,007	0,017	1,580	1,960	0,320	0,090	0,080

Tabulka 11 Chemické složení oceli 25Cr2Ni2MoV dle normy [52].

Prvek		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V
obsah [hm. %]	min	0,22	0,15	0,70	-	-	1,70	1,00	0,75	0,03
	max	0,28	0,35	0,90	0,015	0,015	2,00	1,20	0,90	0,09

Tabulka 12 Tvrdost oceli 20CrNi2MoV měřená za pokojové teploty.

tvrdost	hodnota tvrdosti [-]				
HV10	223	295	256	239	224
HV1	256,4	246,4	254		

Ocel 20CrNi2MoV, stejně jako ocel 25Cr2Ni2MoV, je určena pro svařované rotory. Konkrétní vzorek z oceli 20CrNi2MoV byl na 500 MW rotor výrobce Škoda výzkum.

4.1.4 Ocel 11 416

Českému označení 11 416, odpovídá v evropském systému značení ocel P 265 GH a v německém systému ocel H II. Česká norma byla v roce 1993 zrušena. Chemické složení odpovídající normě 11 416 a chemické složení pozorovaného vzorku oceli je v *tabulkách 13 a 14* [53].

Tabulka 13 Chemické složení oceli 11 416 dle normy [53].

Prvek		C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Cr + Ni + Cu	P	S
obsah [hm. %]	min	-	0,50	-	-	-	-	-	-	-
	max	0,20	-	0,35	0,30	0,30	0,30	0,70	0,040	0,040

Tabulka 14 Chemické složení vzorku oceli 11 416.

Prvek	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Cr + Ni + Cu	P	S
obsah [hm. %]	0,160	0,210	0,440	0,060	0,030	0,065	0,155	0,011	0,006

Mez kluzu R_{eH} nebo $R_{p0,2}$ oceli 11 416 je dle normy minimálně 225 MPa, mez pevnosti R_m by se měla pohybovat v rozmezí 400 – 490 MPa. Tvrdost normou není dána, experimentálně byly zkouškou tvrdosti podle Vickerse naměřeny hodnoty tvrdosti uvedené v *tabulce 15* [53].

Tabulka 15 Tvrdost oceli 11 416 měřená za pokojové teploty.

tvrdost	hodnota tvrdosti [-]				
HV10	106	100	133	124	126
HV1	137,9	137,1	130,1		

Tato ocel je určena na součásti kotlů a tlakových nádob dle ČSN 42 0090 a ČSN 69 0010. Tepelně se zpracovává normalizačním žháním (890 – 920 °C/vzduch), žháním ke snížení pnutí (600 – 650 °C/pozvolné ochlazování) nebo popouštěním (600 – 680 °C/vzduch). Ocel 11 416 je tvářitelná (1100 – 850 °C/vzduch) a je vhodná ke svařování [53].

4.1.5 Ocel ČSN 42 2707

Tomuto českému označení odpovídá v ISO systému označování ocel C23-45BL, v německém systému DIN ocel 17 182 v evropském systému ocel 1.1120. Chemická složení jsou v *tabulkách 16 a 17* [54, 55].

Tabulka 16 Chemické složení oceli 42 2707 dle normy [54].

Prvek	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Ti	Cr + Ni + Cu	P	S
obsah	min	-	1,00	0,20	-	-	-	-	-	-	-	-
[hm. %]	max	0,12	1,60	0,50	0,30	0,40	0,30	0,15	0,03	0,05	0,025	0,025

Tabulka 17 Chemické složení oceli 42 2707.

Prvek	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Cr + Ni + Cu	Mo	P	S	Al
obsah	0,090	1,180	0,370	0,120	0,290	0,290	0,700	0,030	0,010	0,025	0,028
[hm. %]											

Mez kluzu R_{eH} nebo $R_{p0,2}$ oceli ČSN 42 2707 je dle normy minimálně 250 – 270 MPa, mez pevnosti R_m se má být v rozmezí 420 – 570 MPa. Tvrdost HB je dle normy v rozmezí 120 – 160. Na vzorku materiálu byla měřena na několika místech zkouškou tvrdosti podle Vickerse, výsledky tohoto měření jsou v *tabulce 18*. Vrubová houževnatost, která platí pro všechny výrobní stavy je uvedena v *tabulce 19* [54].

Tabulka 18 Tvrdost oceli 42 2707 měřená za pokojové teploty.

tvrdost	hodnota tvrdosti [-]				
HV10	128	119	139	138	130
HV1	128,8	130	130		

Tabulka 19 Vrubová houževnatost oceli 42 2707 dle normy [54].

teplota [°C]	-20	-40	-50	-60
vrubová houževnatost KCV [J·cm ⁻²] min	55	45	40	30
vrubová houževnatost KCU 3 [J·cm ⁻²] min	80	70	60	50

Tato nízkolegovaná manganová ocel s předepsanou závaznou hodnotou vrubové houževnatosti při nízkých teplotách do -60 °C (ve stavu .6 nebo .9) nebo do -40 °C (ve stavu .1 nebo .5) je vhodná pro dynamicky namáhané součásti, např. tělesa armatur nebo součásti kolejových vozidel, používá se také na nádoby reaktorů. Odlitky jsou odlévány do pískových forem. Může být použita za vyšších teplot (až do 450 °C). Je odolná proti tvorbě krystalizačních trhlin. Ocel ČSN 42 2707 je svařitelná, tepelně se zpracovává normalizačním žíháním (920 – 960 °C/vzduch), homogenizačním žíháním (980 – 1050 °C/vzduch), kalením (920 – 960 °C/voda) nebo popouštěním (620 – 670 °C/vzduch) [54].

Společnost Škoda z této oceli vyrábí nádoby CASTOR® pro transport a skladování vyhořelého paliva z vodo-vodního jaderného reaktoru VVER 440 [55].

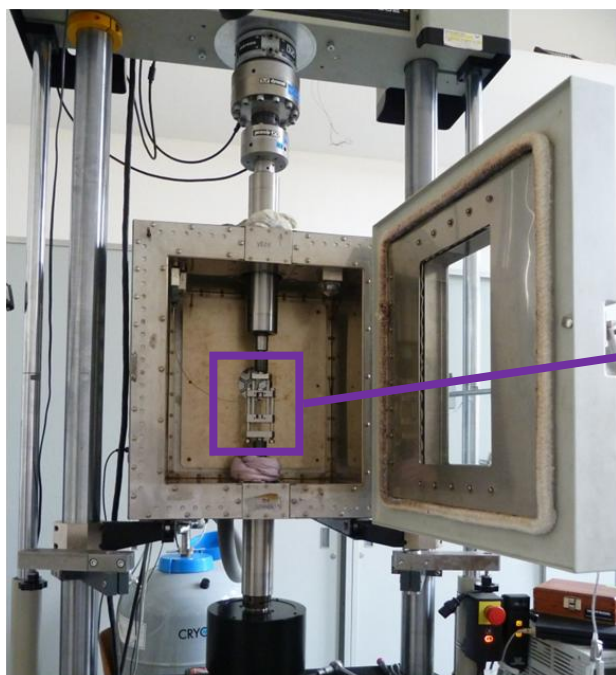
4.2 Experimentální zařízení

Většina zkoušek za pokojové teploty byla provedena na creepovém stroji upraveném pro zkoušky na miniaturních discích, a to jak zkoušky při konstantním zatížení (CDR-CF), tak zkoušky s konstantní rychlostí posuvu (SPT-CDR). Tento přístroj umožňuje realizaci vysokoteplotních zkoušek až do 1000 °C. Creepové zkoušky na standardních zkušebních tělesech lze provádět buď při konstantní síle (max. síla 8000 N, max. deformace 0,60, max. skutečná deformace 0,47), nebo při konstantním napětí (max. počáteční síla 8000 N, max. deformace 0,42, max. skutečná deformace 0,35).

Zkoušky za snížených a zvýšených teplot a 2 zkoušky za pokojové teploty byly provedeny na univerzálním zkušebním stroji INSTRON 8862 s elektromechanickým pohonem. Zkoušky byly provedeny v teplotní komoře. Pro zkoušky na tomto zařízení musel být vyroben přípravek pro upnutí a zatížení zkušební vzorku. Posunutí razníku, resp. prohloubení vzorku bylo měřeno při pokojové teplotě extenzometrem MTS 634.12F-51 vhodným pro statické i dynamické zatížení. Při snížených a zvýšených teplotách bylo posunutí měřeno dynamickým extenzometrem INSTRON 2620-602 s teplotním rozsahem -40 °C až +150 °C. Na obr. 25 je fotografie zkušebního zařízení s přípravkem a upnutým extenzometrem. Přípravek je vyroben z niklové slitiny Inconel 718, detail přípravku a všech jeho částí je na obr. 26.

Struktura ocelových vzorků byla pozorována světelným mikroskopem GX 51 fy Olympus, ke kterému byla připojena CCD kamera Olympus Colorview III, pro pořízení fotografií mikrostruktury vzorků.

Lomové plochy vzorků byly pozorovány a dokumentovány rastrovacími elektronovými mikroskopy LYRA 3 XMU s fokusovaným iontovým svazkem a s analyzátory EDX a EBSD fy Tescan a JEOL 6460 s analyzátory Oxford Instruments INCA Energy (EDX), INCA Wave (WDX) a INCA Crystal (EBSD) fy Jeol.



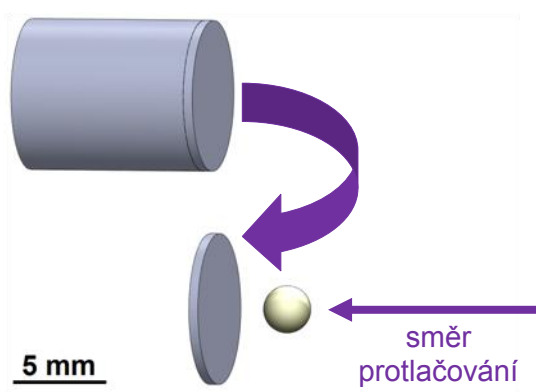
Obr. 25 Zkušební zařízení s přípravkem, upnutým extenzometrem a termočlánkem



Obr. 26 Detail jednotlivých částí přípravku pro provádění protlačovacích zkoušek

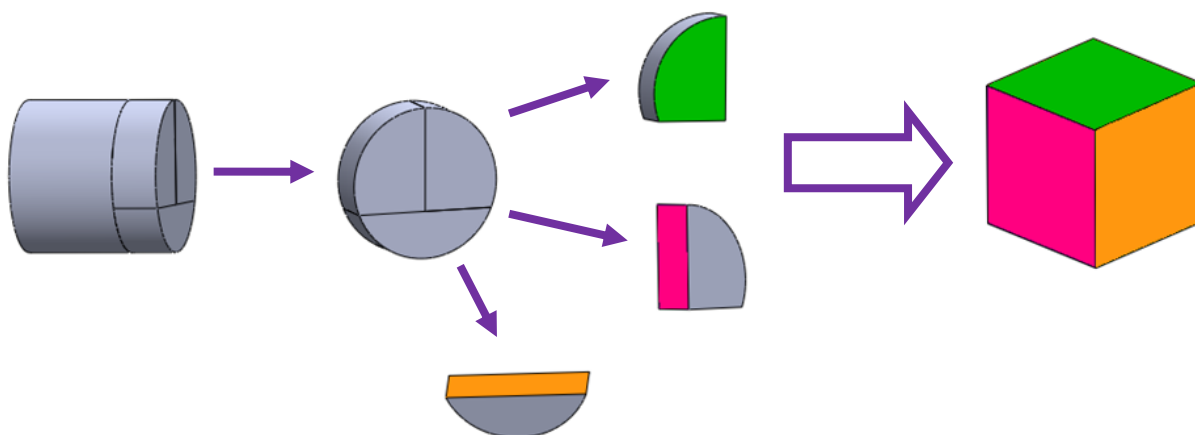
4.3 Příprava vzorků

Vzorky pro protlačovací zkoušky byly vyrobeny z tahových tyčí. Tyče byly osoustruženy na průměr 8 mm a nařezány na plátky o tloušťce přibližně 1 mm. Jednotlivé plátky byly poté zbrušeny na zařízeních pro broušení a leštění Saphir 330 fy ATA a Spectrum System 1000 fy Leco. Broušení probíhalo z obou stran vzorku na brusných papírech o zrnitosti 200, 400, 600, 800, 1200 a 2400 fy MESH. Konečná tloušťka vzorků byla $0,500 \pm 0,003$ mm. Směr protlačování vzorků je zobrazen na obr. 27.



Obr. 27 Schéma směru protlačování vzhledem k orientaci vzorků v tyči pro tahovou zkoušku

Vzorky pro pozorování mikrostruktury byly také vyrobeny z tahových tyčí. Rozřezány byly na diamantové pile Leco VC-50 podle schématu na obr. 28 pro pozorování mikrostruktury ve všech 3 směrech. Vzorky zalité zalévací hmotou byly poté vybroušeny na zařízeních pro broušení a leštění Saphir 330 fy ATA a Spectrum System 1000 fy Leco a vyleštěny na leštícím zařízení pro broušení a leštění DP – U fy Struers diamantovou pastou o zrnitosti 1 μ m. Všechny oceli s výjimkou oceli P91 byly leptány 2% roztokem Nitalu. Ocel P91 byla naleptána leptadlem Villea-Bain.



Obr. 87 Schematické znázornění míst odběru vzorků pro pozorování mikrostruktury ocelí

4.4 Příprava experimentů

Vzorky ve tvaru disku byly vloženy do přípravku (obr. 26) a pevně v něm sevřeny. Přípravek se vzorkem byl následně připevněn do upraveného creepového přístroje, resp. do inverzní klece, která byla upnuta do univerzálního zkušebního stroje. Creepový stroj má v sobě zabudovaný inverzní mechanismus, který umožňuje provádět protlačovací zkoušky. Zkušební vzorky byly zatěžovány konstantní rychlostí pohybu razníku 0,25 mm/min.

Stálá teplota zkoušek na creepovém přístroji byla 20 °C, udržována byla pomocí klimatizace celé creepové laboratoře. Teplota zkoušek na univerzálním zkušebním stroji byla udržována pomocí teplotní komory viditelné na obr. 25. Nízké teploty (do -40 °C) byly dosaženy ohlazováním vnitřního prostoru parami tekutého dusíku.

4.5 Hodnocení zkoušek

Výstupem všech protlačovacích zkoušek na miniaturních discích byly závislosti síla - posunutí razníku. Hodnota posunutí razníku odpovídá prohloubení vzorku v průběhu zkoušky. Z této závislosti byly vyhodnoceny: síla F_e , maximální síla F_m , mez kluzu R_e , mez pevnosti R_m a lomová energie E^{SP} . Vyhodnocovacími metodami byly zvoleny metoda smluvní (offset) (obr. 11) a metoda dvou tečen (obr. 12). Výpočty meze kluzu a meze pevnosti byly provedeny podle rovnic 1 až 4.

Z výsledných hodnot byly pro lepší porovnání s výsledky tahových zkoušek sestaveny tabulky a také vytvořeny grafy.

Z první skupiny zkoušek provedených za pokojové teploty v creepové laboratoři byly vytvořeny korelační závislosti meze kluzu R_e a meze pevnosti R_m získaných konvenční tahovou zkouškou na silách F_e , resp. F_m získaných protlačovací zkouškou. Zkušební vzorky byly vyrobeny z ocelí P91, 10Ch2MFA, 20CrNi2MoV, 11 416 a 42 2707.

Z druhé skupiny zkoušek provedených na tahovém stroji Instron byla vytvořena závislost meze kluzu R_e a meze pevnosti R_m na teplotě zkoušky. Tyto teplotní závislosti byly porovnány s teplotními závislostmi získanými konvenční tahovou zkouškou. Zkušební vzorky byly vyrobeny z ocelí P91 a 42 2707.

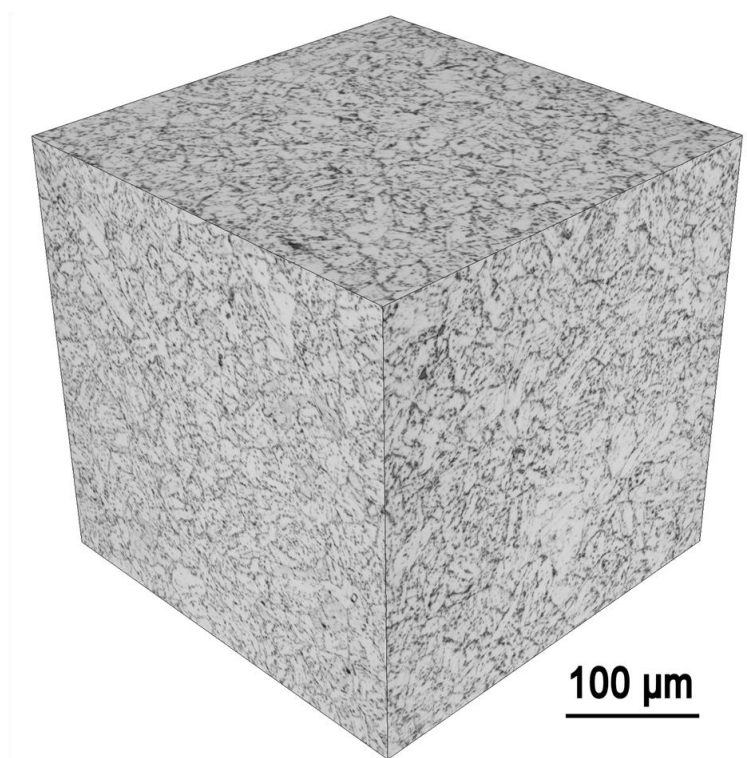
5 VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ

5.1 Zkoušky za pokojové teploty

Pro provedení protlačovacích zkoušek na miniaturních discích za pokojové teploty bylo použito 7 vzorků každé ze všech pěti druhů ocelí (P91, 10Ch2MFA, 20CrNi2MoV, 11 416 a 42 2707). Konvenční tahové zkoušky byly provedeny na 2 – 3 vzorcích. Výsledky zkoušek a jejich hodnocení je uvedeno v následujících podkapitolách.

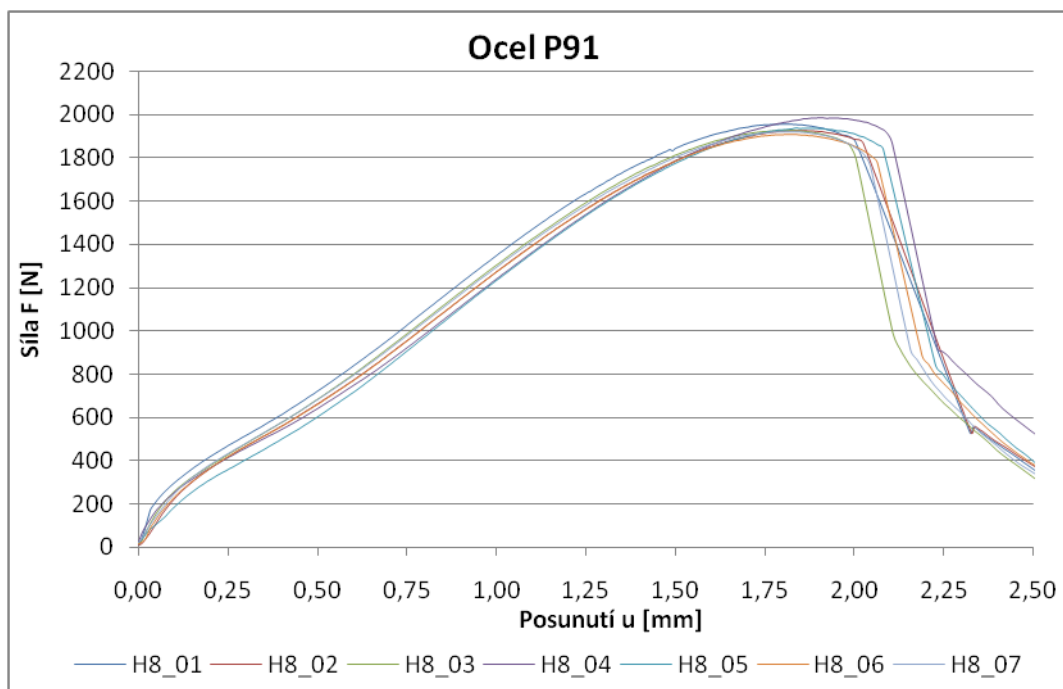
5.1.1 Ocel P91

Struktura oceli P91 je bainitická s karbidy chromu (*obr. 29*). Průměrná velikost zrna je přibližně 20 μm .



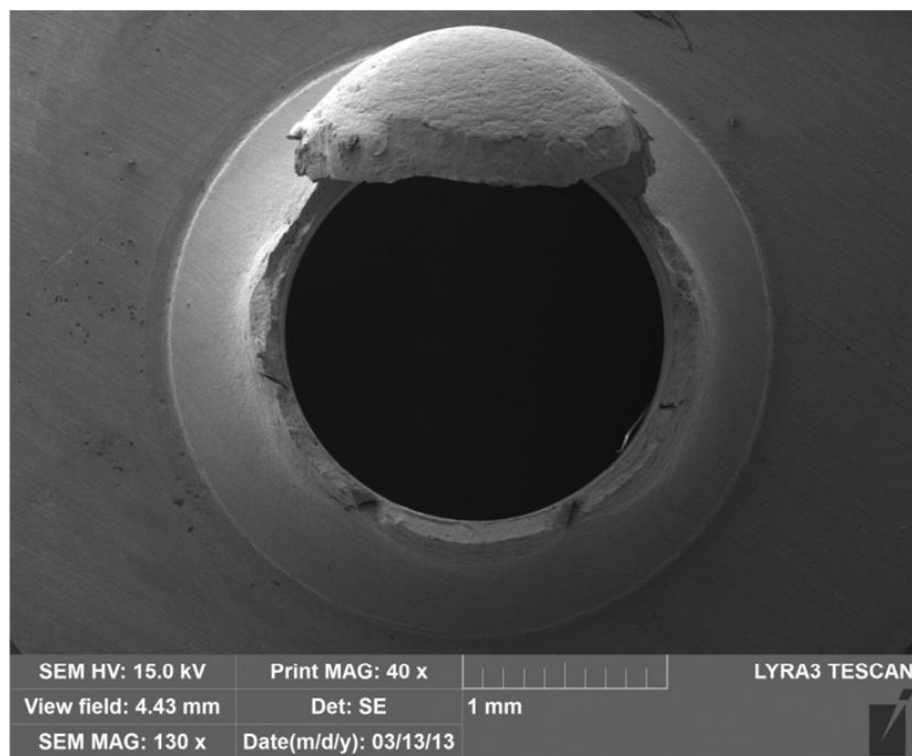
Obr. 29 3D struktura oceli P91

Záznamem zkoušek jsou grafy závislosti síla - posunutí. Pro porovnání výsledků jednotlivých zkoušek byly záznamy vloženy do jednoho grafu na obr. 30.

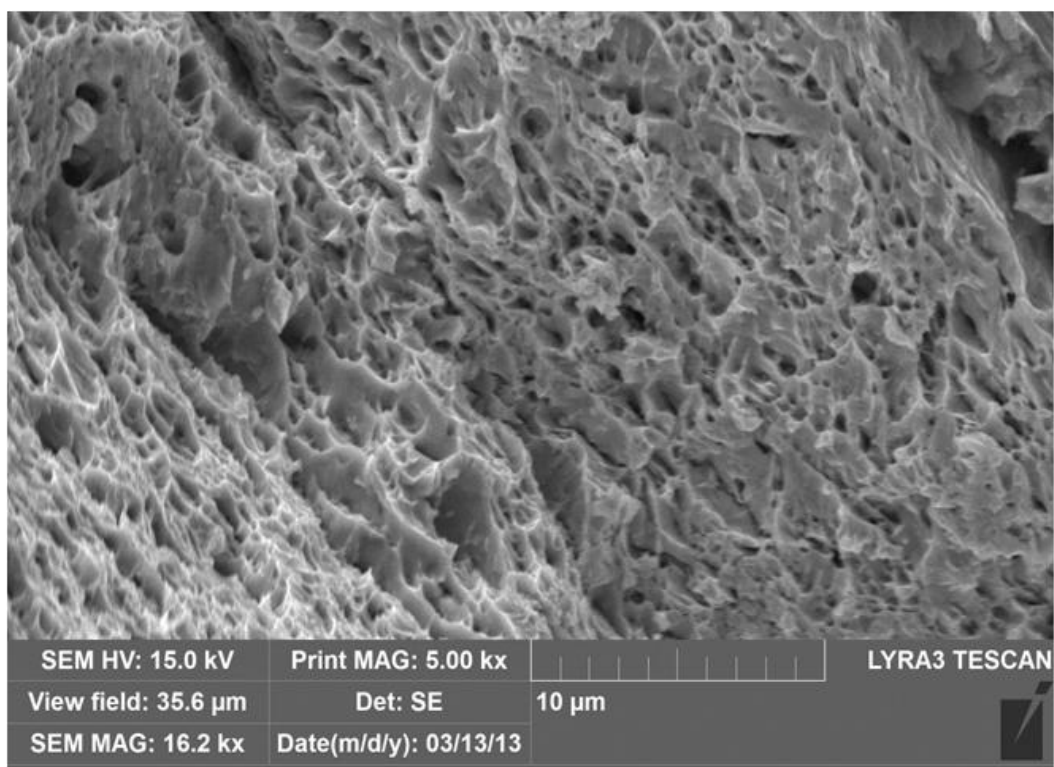


Obr. 30 Závislost síla - posunutí pro všech 7 zkušebních vzorků oceli P91

Lomová plocha disků po ukončené protlačovací zkoušce se na jednotlivých vzorcích oceli P91 nelišila. Všechny vzorky byly porušeny transkrystalickým tvárným lomem. Na obr. 31 je fotografie porušeného vzorku. Detail lomové plochy vzorku je na obr. 32.

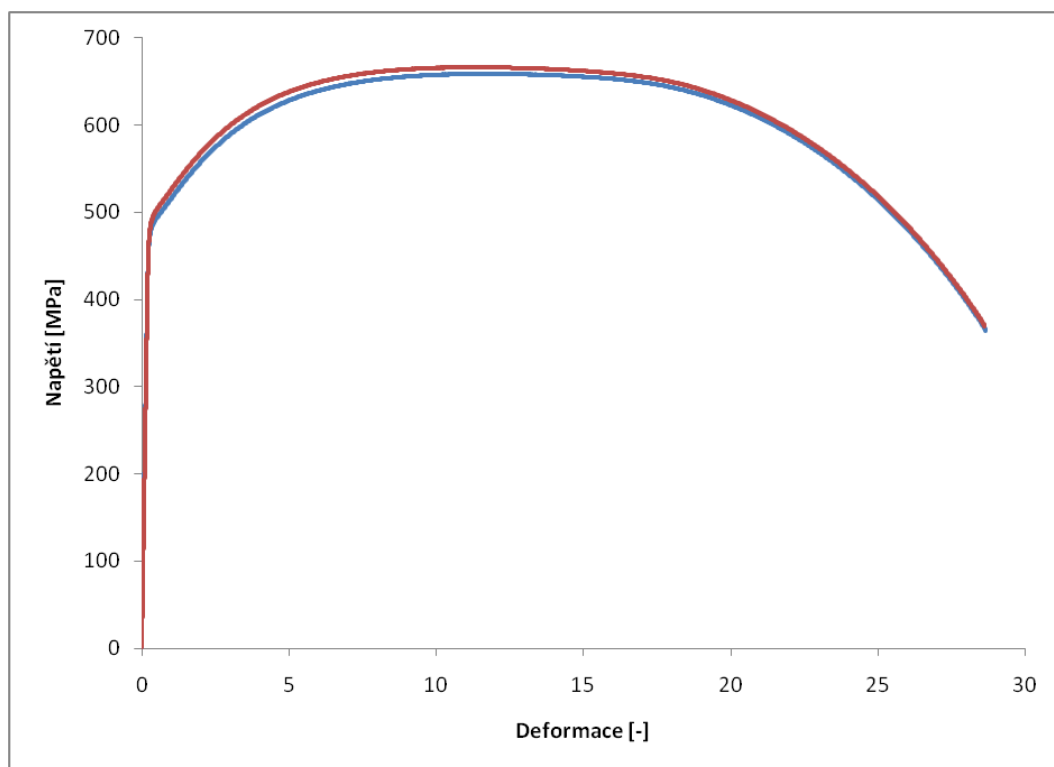


Obr. 31 Fotografie porušeného vzorku oceli P91, zvětšeno 40x



Obr. 32 Detail tvárné lomové plochy oceli P91, zvětšeno 5000x

Graf závislosti napětí deformace pro 2 tahové vzorky oceli P91 je vykreslen na obr. 33. Je z něj patrné, že ocel P91 je ocel s nevýraznou mezí kluzu.



Obr. 33 Graf závislosti napětí deformace ocel P91

Výsledky tahových zkoušek na hladkých tyčích z oceli P91 jsou uvedeny v *tabulce 20*. Hodnoty postupně získané ze závislosti síla - posunutí a vstupní data experimentu jsou zpracovány v *tabulce 21*.

Tabulka 20 Výsledky tahových zkoušek oceli P91 provedených za pokojové teploty.

zkušební těleso	teplota	mez kluzu	mez pevnosti	tažnost	zúžení celkové	skutečné napětí na mezi pevnosti	skutečná deformace na mezi pevnosti	lomová deformace
	t	R _e	R _m	A	Z	σ _m	ε _{pn}	ε _u
	[°C]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]	[%]	[%]
H15.1	20	499	666	28,69	75,75	766	0,1399	1,4169
H8.1	20	490	659	-	75,55	757	0,1395	1,4084
průměr	20	495	663	28,69	75,65	762	0,1397	1,413

Tabulka 21 Výsledky protlačovacích zkoušek na miniaturních discích oceli P91 provedených za pokojové teploty

Ocel P91		označení tělesa		1	2	3	4	5	6	7	průměrné hodnoty
		veličina	jednotka	H8_01	H8_02	H8_03	H8_04	H8_05	H8_06	H8_07	
teplota		t	[°C]	20	20	20	20	20	20	20	20
počáteční tloušťka vzorku		h ₀	[mm]	0,500	0,501	0,502	0,501	0,500	0,503	0,502	0,501
posunutí při max. zatížení		u _m	[mm]	1,810	1,851	1,813	1,900	1,837	1,817	1,804	1,833
síla F _e		F _e	[N]	305	375	320	272	304	295	343	316
síla F _m		F _m	[N]	1957	1927	1927	1984	1937	1910	1921	1938
lomová energie		E ^{SP}	[J]	2,979	2,868	2,595	2,781	2,694	2,686	2,668	2,753
SMLUVNÍ METODA											
mez kluzu	Guan, Wang	R _e	[MPa]	613	780	637	547	611	587	681	636
	Mao, Takahashi	R _e	[MPa]	439	564	457	390	438	420	490	457
mez pevnosti	Guan, Wang	R _m	[MPa]	667	657	655	672	662	649	654	660
	Mao, Takahashi	R _m	[MPa]	698	678	674	708	687	661	671	682
METODA DVOU TEČEN											
mez kluzu	Guan, Wang	R _e	[MPa]	572	644	519	491	448	523	565	537
	Mao, Takahashi	R _e	[MPa]	409	462	369	349	317	372	404	383
mez pevnosti	Guan, Wang	R _m	[MPa]	667	657	655	672	662	649	654	660
	Mao, Takahashi	R _m	[MPa]	698	678	674	708	687	661	671	682

V následující tabulce (tabulka 22) jsou pro porovnání shrnuty výsledky konvenční tahové zkoušky a protlačovací zkoušky na miniaturních discích.

Tabulka 22 Souhrnná tabulka výsledků tahové a protlačovací zkoušky oceli P91.

P91		Tahová zkouška		Protlačovací zkouška							
		μ	σ	smluvní metoda				metoda dvou tečen			
				GW		MT		GW		MT	
				μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
mez kluzu	[MPa]	495	2	636	70	457	52	537	59	383	44
mez pevnosti	[MPa]	663	3,5	660	8	682	15	660	8	682	15

kde μ je střední hodnota

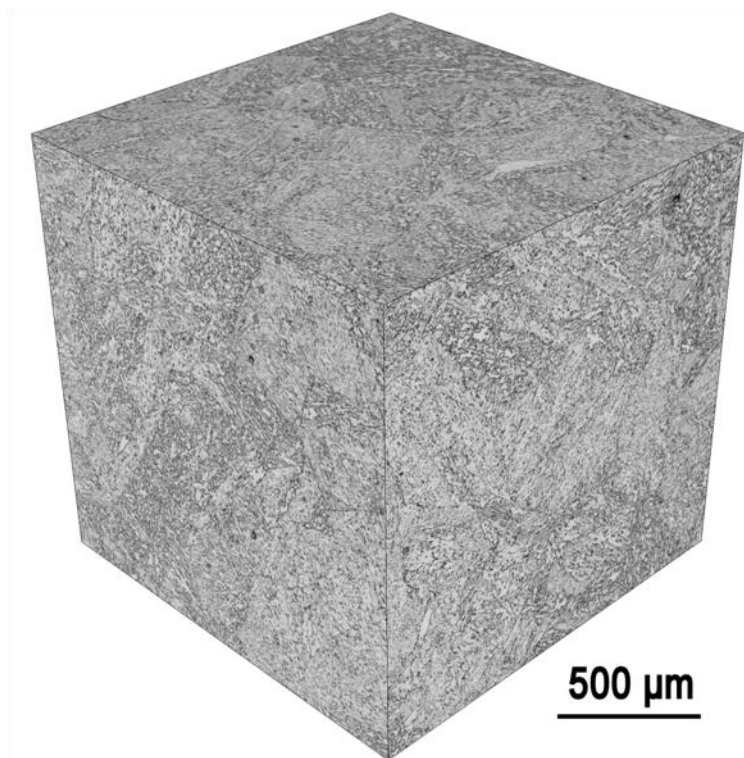
σ je směrodatná odchylka

GW je výpočetní metoda podle Guana a Wangu (rovnice 3)

MT je výpočetní metoda podle Maa a Takahashiho (rovnice 1)

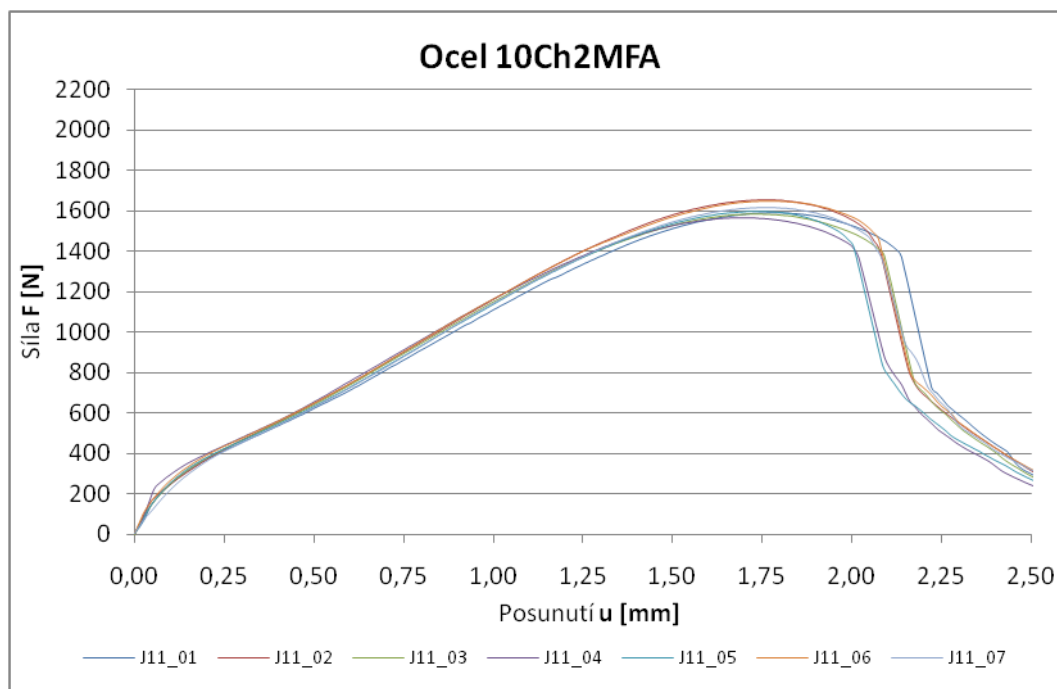
5.1.2 Ocel 10Ch2MFA

Struktura oceli 10Ch2MFA je bainitická s karbidy chromu, manganu, molybdenu a vanadu (obr. 34). Průměrná velikost zrna je přibližně 400 μm .



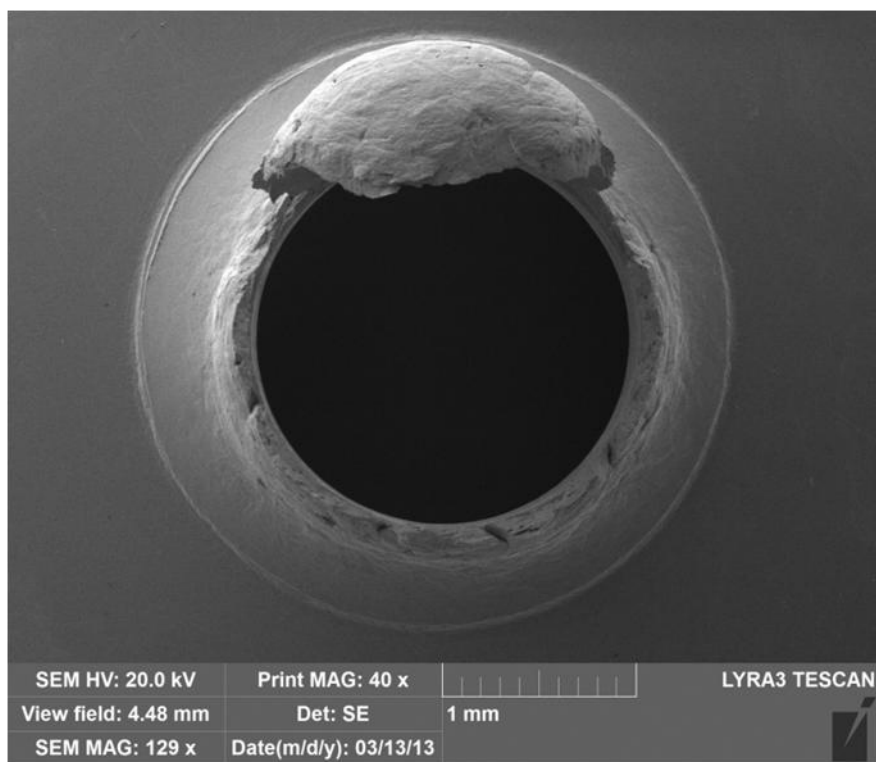
Obr. 34 3D struktura oceli 10Ch2MFA

Záznamem zkoušek jsou grafy závislosti síla - posunutí. Pro porovnání výsledků jednotlivých zkoušek byly záznamy vloženy do jednoho grafu na obr. 35.

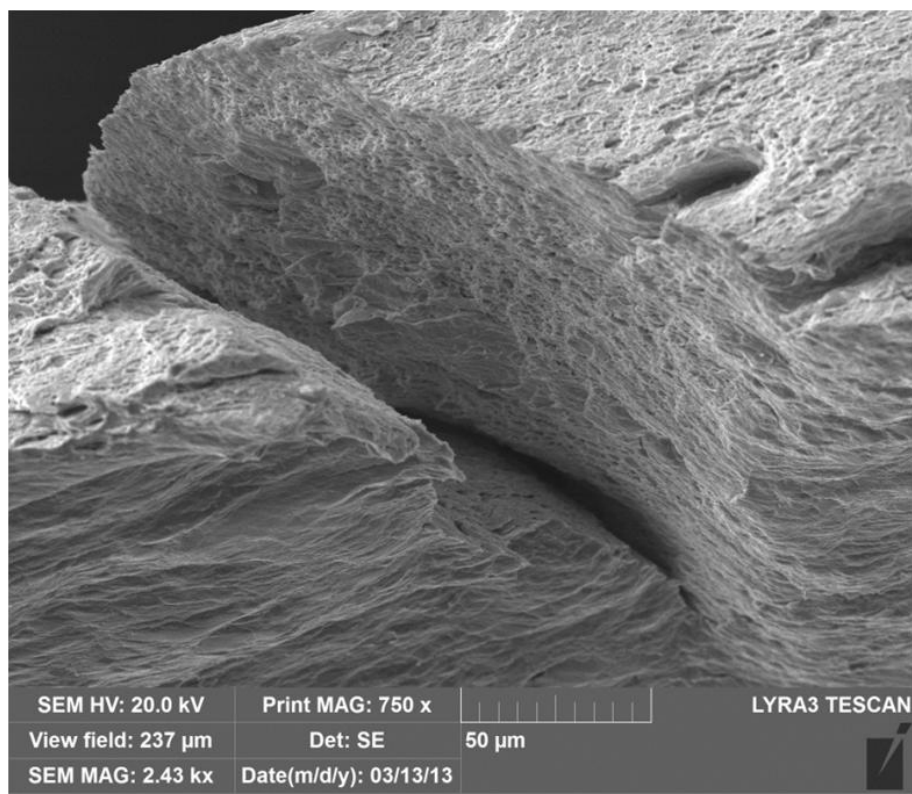


Obr. 35 Závislost síla - posunutí pro všech 7 zkušebních vzorků oceli 10Ch2MFA

Lomová plocha disků po ukončené protlačovací zkoušce se na jednotlivých vzorcích oceli 10Ch2MFA nelišila. Všechny vzorky byly porušeny transkrystalickým tvárným lomem. Na obr. 36 je fotografie porušeného vzorku. Detail lomové plochy vzorku je na obr. 37.

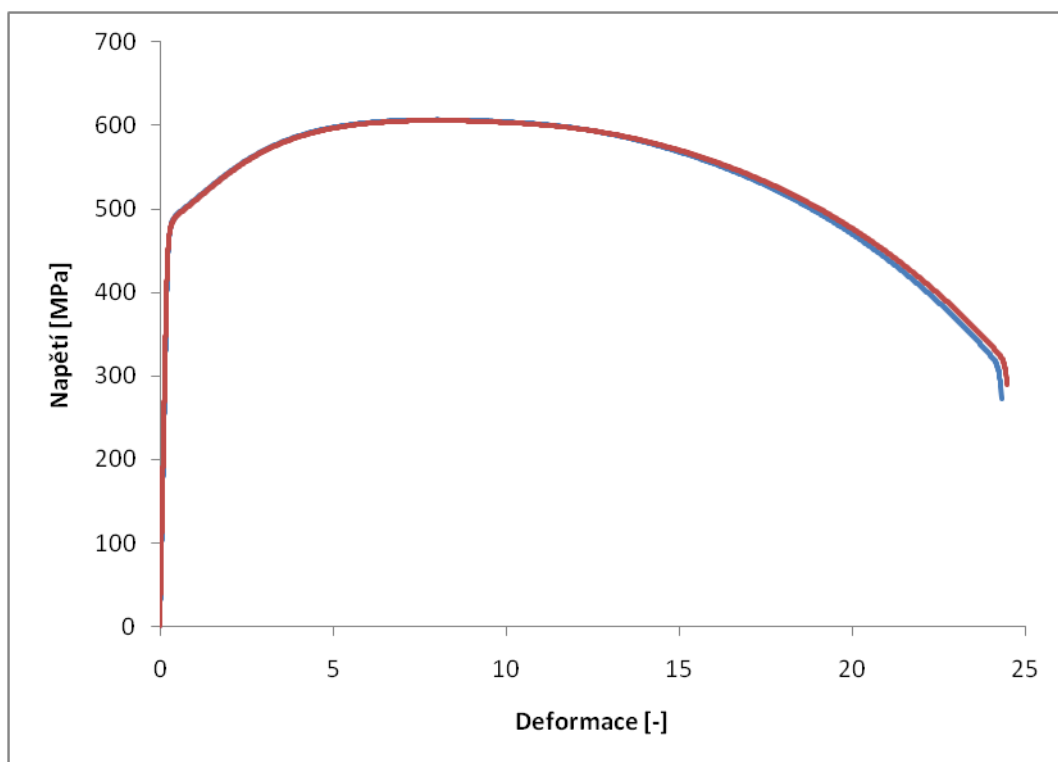


Obr. 36 Fotografie porušeného vzorku oceli 10Ch2MFA, zvětšeno 40x



Obr. 37 Detail tvárné lomové plochy oceli 10Ch2MFA, zvětšeno 750x

Graf závislosti napětí deformace pro 2 tahové vzorky oceli 10Ch2MFA je vykreslen na obr. 38. Z tohoto grafu je zřejmé, že také ocel 10CH2MFA je ocel s nevýraznou mezí kluzu.



Obr. 38 Graf závislosti napětí deformace ocel 10Ch2MFA

Výsledky tahových zkoušek na hladkých tyčích z oceli 10Ch2MFA jsou v *tabulce 23*. Hodnoty postupně získané ze závislosti síla - posunutí a vstupní data experimentu jsou zpracovány v *tabulce 24*.

Tabulka 23 Výsledky tahových zkoušek oceli 10Ch2MFA provedených za pokojové teploty.

zkušební těleso	teplota	mez kluzu	mez pevnosti	tažnost	zúžení celkové	skutečné napětí na mezi pevnosti	skutečná deformace na mezi pevnosti	lomová deformace
	t	R _e	R _m	A	Z	σ _m	ε _{pn}	ε _u
	[°C]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]	[%]	[%]
J1	20	492	607	24,88	78,49	664	0,0906	1,5366
J12	20	490	606	25,26	79,02	662	0,0882	1,5617
průměr	20	491	606	25,07	78,76	663	0,089	1,549

Tabulka 24 Výsledky protlačovacích zkoušek na miniaturních discích oceli 10Ch2MFA provedených za pokojové teploty.

Ocel 10Ch2MFA		označení tělesa		1	2	3	4	5	6	7	průměrné hodnoty
		veličina	jednotka	J11_1	J11_2	J11_3	J11_4	J11_5	J11_6	J11_7	
teplota	t	[°C]		20	20	20	20	20	20	20	20
počáteční tloušťka vzorku	h ₀	[mm]		0,497	0,501	0,503	0,498	0,498	0,497	0,502	0,499
posunutí při max. zatížení	u _m	[mm]		1,790	1,773	1,734	1,697	1,741	1,786	1,764	1,755
síla F _e	F _e	[N]		318	280	285	335	328	295	325	309
síla F _m	F _m	[N]		1591	1652	1586	1567	1599	1646	1616	1608
lomová energie	E ^{SP}	[J]		2,377	2,372	2,342	2,231	2,207	2,384	2,312	2,318
SMLUVNÍ METODA											
mez kluzu	Guan, Wang	R _e	[MPa]	645	562	567	676	662	600	646	623
	Mao, Takahashi	R _e	[MPa]	463	402	406	486	476	430	464	447
mez pevnosti	Guan, Wang	R _m	[MPa]	575	584	564	567	575	590	573	575
	Mao, Takahashi	R _m	[MPa]	517	536	495	501	518	546	514	518
METODA DVOU TĚČEN											
mez kluzu	Guan, Wang	R _e	[MPa]	578	538	536	596	596	573	569	569
	Mao, Takahashi	R _e	[MPa]	413	384	383	427	427	410	407	407
mez pevnosti	Guan, Wang	R _m	[MPa]	575	584	564	567	575	590	573	575
	Mao, Takahashi	R _m	[MPa]	517	536	495	501	518	546	514	518

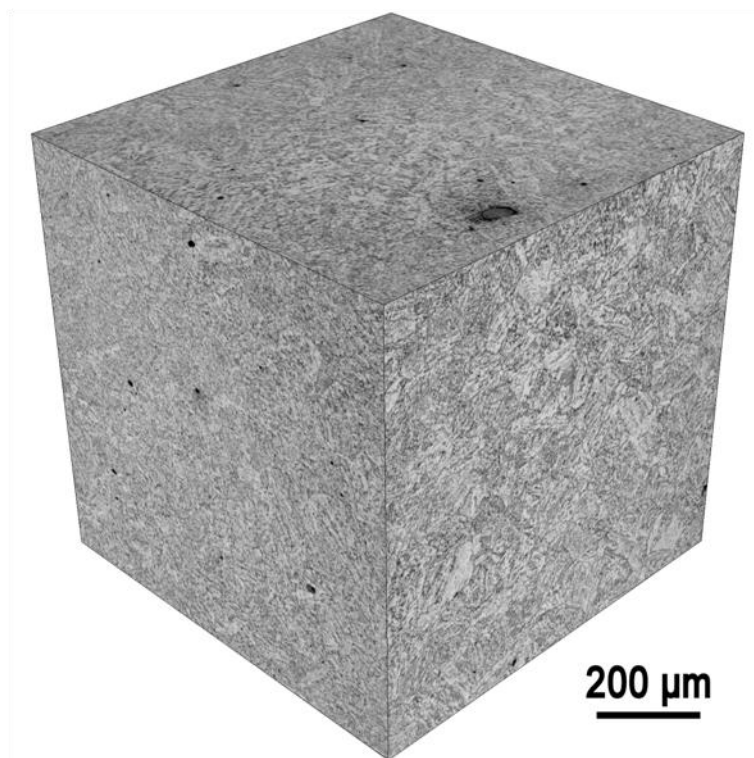
V následující tabulce (tabulka 25) jsou pro porovnání shrnuty výsledky konvenční tahové zkoušky a protlačovací zkoušky na miniaturních discích.

Tabulka 25 Souhrnná tabulka výsledků tahové a protlačovací zkoušky oceli 10Ch2MFA.

10Ch2MFA		Tahová zkouška		Protlačovací zkouška							
		μ	σ	smluvní metoda				metoda dvou tečen			
				GW		MT		GW		MT	
				μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
mez kluzu	[MPa]	491	1	623	43	447	32	569	23	407	17
mez pevnosti	[MPa]	606	0,5	575	9	518	17	575	9	518	17

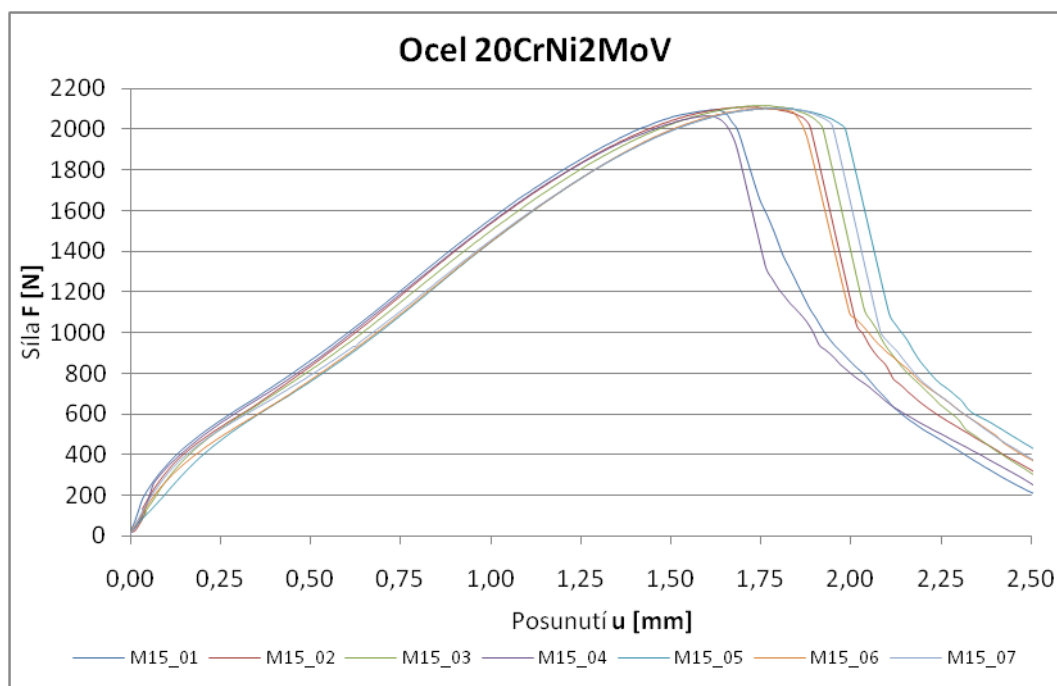
5.1.3 Ocel 20CrNi2MoV

Struktura oceli 20CrNi2MoV je bainitická s karbidy chromu, manganu, molybdenu a vanadu (obr. 39). Průměrná velikost zrna je přibližně 50 μm .



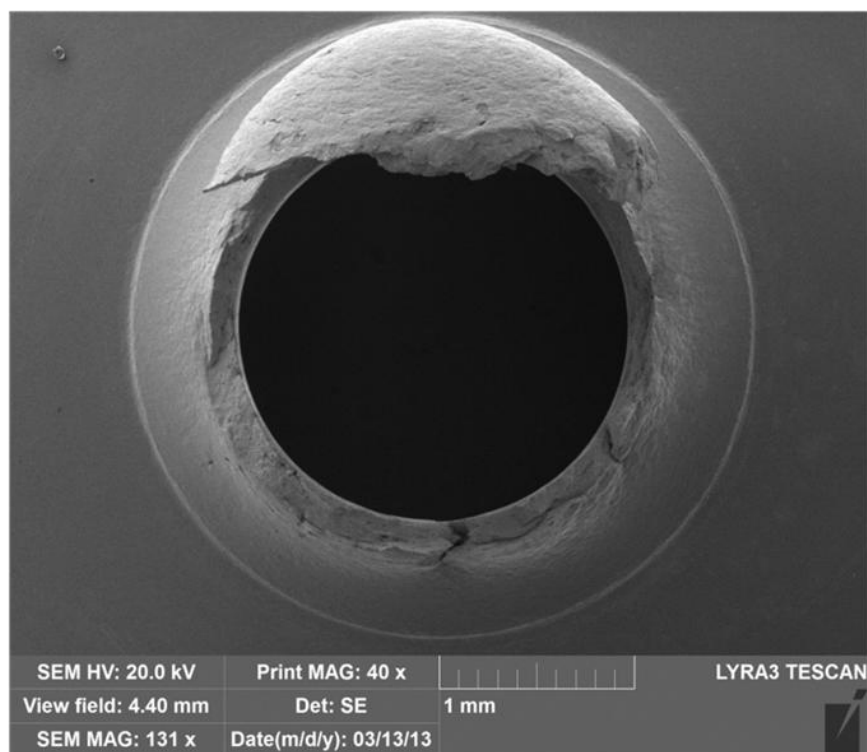
Obr. 39 3D struktura oceli 20CrNi2MoV

Záznamem zkoušek jsou grafy závislosti síla - posunutí. Pro porovnání výsledků jednotlivých zkoušek byly záznamy vloženy do jednoho grafu na obr. 40.

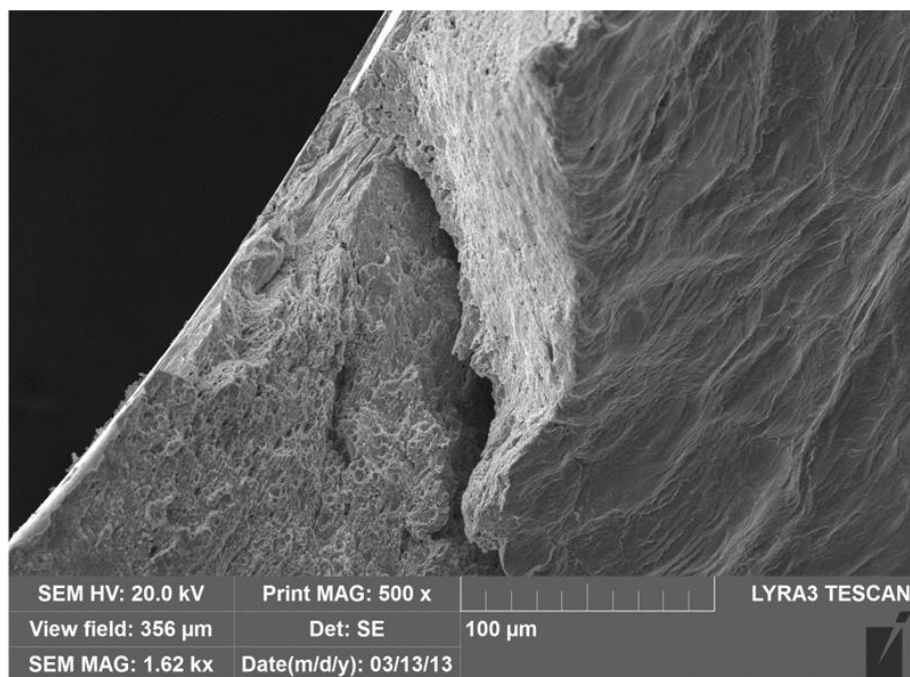


Obr. 40 Závislost síla - posunutí pro všech 7 zkušebních vzorků oceli 20CrNi2MoV

Lomová plocha disků po ukončené protlačovací zkoušce se na jednotlivých vzorcích oceli 20CrNi2MoV nelišila. Všechny vzorky byly porušeny transkrystalickým tvárným lomem. Na obr. 41 je fotografie porušeného vzorku. Detail lomové plochy vzorku je na obr. 42.

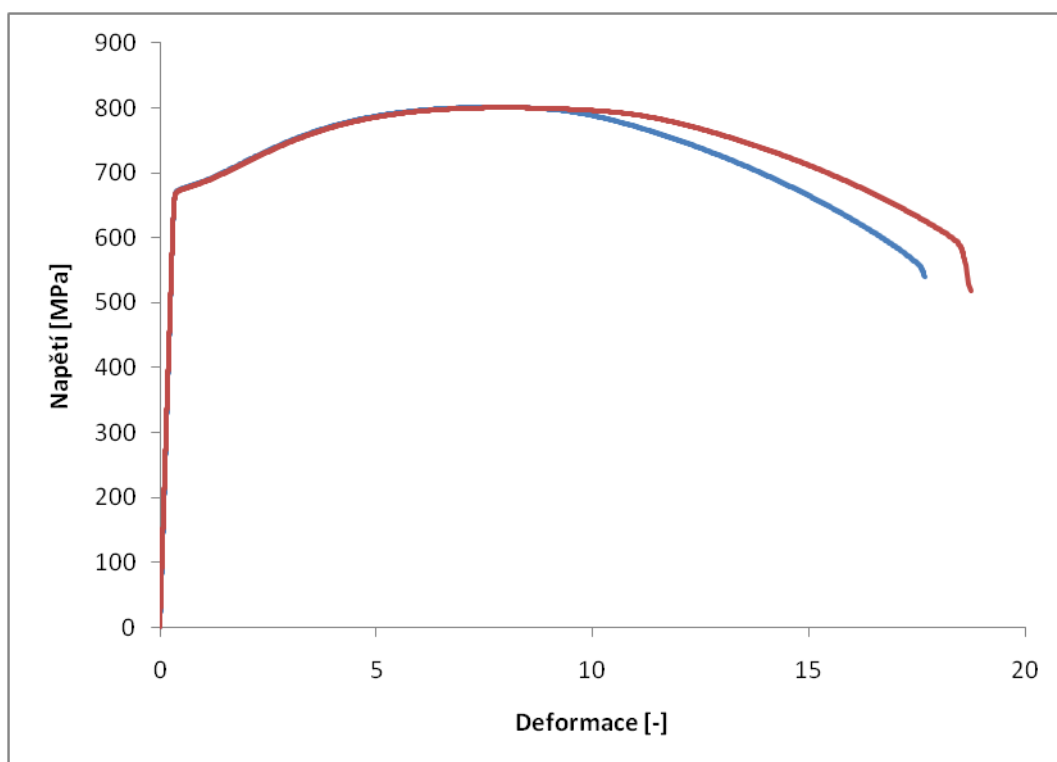


Obr. 41 Fotografie porušeného vzorku oceli 20CrNi2MoV, zvětšeno 40x



Obr. 42 Detail tvárné lomové plochy oceli 20CrNi2MoV, zvětšeno 500x

Graf závislosti napětí deformace pro 2 tahové vzorky oceli 20CrNi2MoV je vykreslen na obr. 43. Ocel 20CrNi2MoV má nevýraznou mez kluzu.



Obr. 43 Graf závislosti napětí deformace ocel 20CrNi2MoV

Výsledky tahových zkoušek na hladkých tyčích z oceli 20CrNi2MoV jsou v *tabulce 26*.

Tabulka 26 Výsledky tahových zkoušek oceli 20CrNi2MoV provedených za pokojové teploty.

zkušební těleso	teplota	mez kluzu	mez pevnosti	tažnost	zúžení celkové	skutečné napětí na mezi pevnosti	skutečná deformace na mezi pevnosti	lomová deformace
	t	R _e	R _m	A	Z	σ _m	ε _{pn}	ε _u
	[°C]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]	[%]	[%]
M1	20	676	801	18,35	57,13	862	0,0733	0,8469
M2	20	675	800	19,47	56,22	879	0,0935	0,8260
průměr	20	676	801	18,91	56,67	870	0,083	0,836

Hodnoty postupně získané ze závislostí síla - posunutí a vstupní data experimentu jsou zpracovány v *tabulce 27*.

Tabulka 27 Výsledky protlačovacích zkoušek na miniaturních discích oceli 20CrNi2MoV provedených za pokojové teploty.

Ocel 20CrNi2MoV		označení tělesa		1	2	3	4	5	6	7	průměrné hodnoty
		veličina	jednotka	M15_01	M15_02	M15_03	M15_04	M15_05	M15_06	M15_07	
teplota	t	[°C]		20	20	20	20	20	20	20	20
počáteční tloušťka vzorku	h ₀	[mm]		0,500	0,501	0,501	0,501	0,500	0,499	0,500	0,500
posunutí při max. zatížení	u _m	[mm]		1,630	1,708	1,731	1,596	1,837	1,767	1,781	1,722
síla F _e	F _e	[N]		402	428	481	436	582	406	428	452
síla F _m	F _m	[N]		2094	2110	2118	2066	2101	2104	2101	2099
lomová energie	E ^{SP}	[J]		2,336	2,764	2,777	2,262	2,908	2,613	2,911	2,653
SMLUVNÍ METODA											
mez kluzu	Guan, Wang	R _e	[MPa]	801	848	950	863	1150	812	851	896
	Mao, Takahashi	R _e	[MPa]	579	614	690	625	838	587	616	650
mez pevnosti	Guan, Wang	R _m	[MPa]	704	706	708	694	706	709	706	705
	Mao, Takahashi	R _m	[MPa]	769	773	777	750	773	778	773	770
METODA DVOU TĚČEN											
mez kluzu	Guan, Wang	R _e	[MPa]	690	735	805	754	912	692	749	763
	Mao, Takahashi	R _e	[MPa]	497	530	582	544	662	498	541	551
mez pevnosti	Guan, Wang	R _m	[MPa]	704	706	708	694	706	709	706	705
	Mao, Takahashi	R _m	[MPa]	769	773	777	750	773	778	773	770

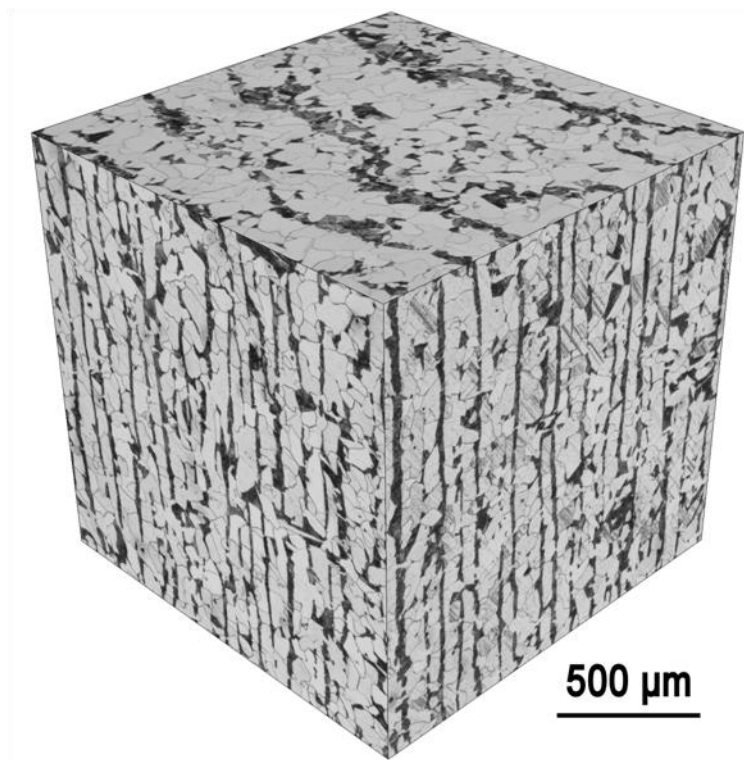
V následující tabulce (*tabulka 28*) jsou pro porovnání shrnuty výsledky konvenční tahové zkoušky a protlačovací zkoušky na miniaturních discích.

Tabulka 28 Souhrnná tabulka výsledků tahové a protlačovací zkoušky oceli 20CrNi2MoV.

20CrNi2MoV		Tahová zkouška		Protlačovací zkouška							
		μ	σ	smluvní metoda				metoda dvou tečen			
				GW		MT		GW		MT	
				μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
mez kluzu	[MPa]	676	0,5	896	84	650	84	763	71	551	53
mez pevnosti	[MPa]	801	0,5	705	5	770	9	705	5	770	9

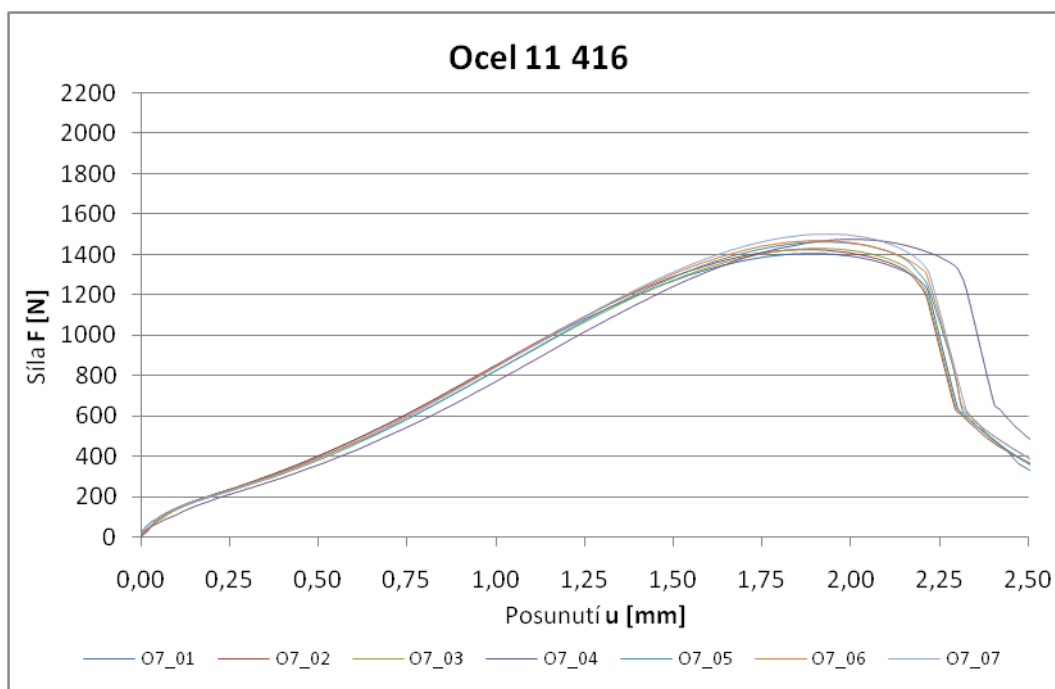
5.1.4 Ocel 11 416

Struktura oceli 11 416 je feriticko-perlitická řádkovitě uspořádaná (*obr. 44*). Průměrná velikost zrna v ploše kolmé ke směru tváření je přibližně 50 μm .



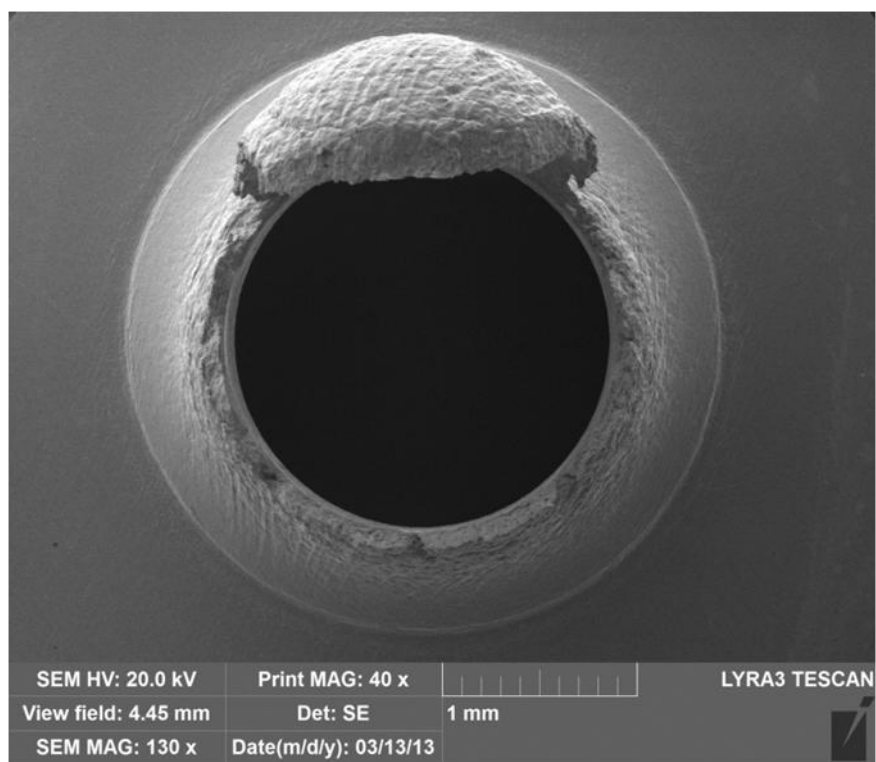
Obr. 44 3D struktura oceli 11 416

Záznamem zkoušek jsou grafy závislosti síla - posunutí. Pro porovnání výsledků jednotlivých zkoušek byly záznamy vloženy do jednoho grafu na obr. 45.

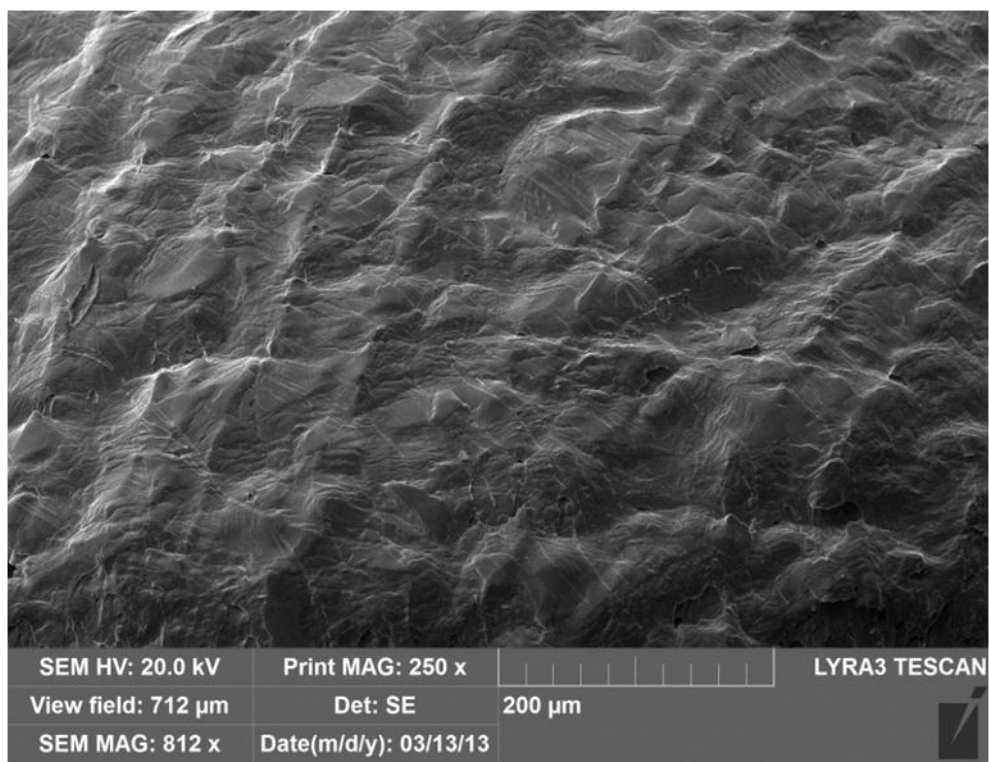


Obr. 45 Závislost síla - posunutí pro všech 7 zkušebních vzorků oceli 11 416

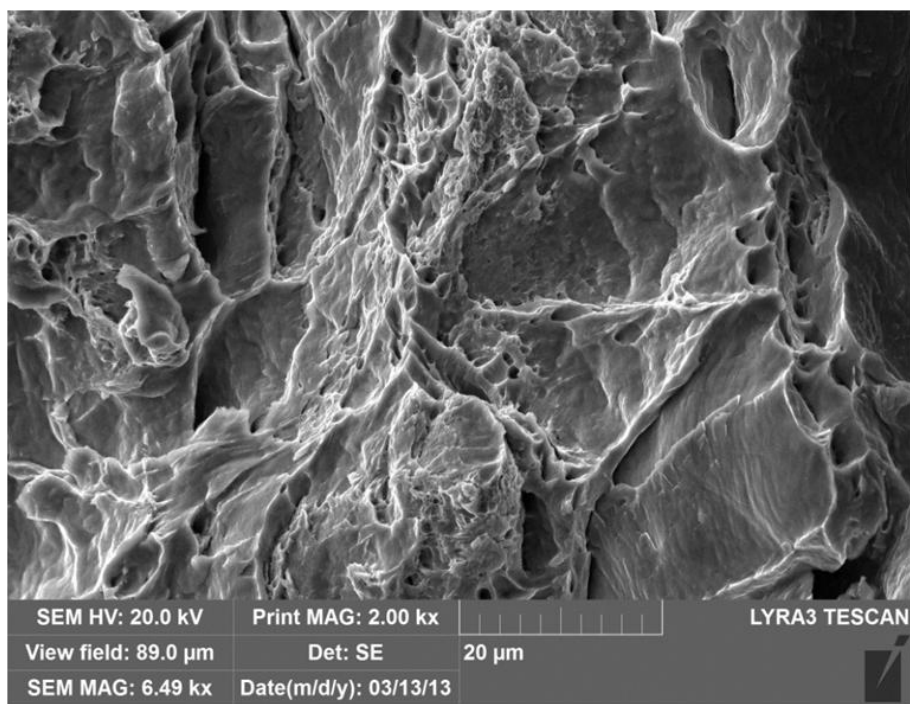
Lomová plocha disků po ukončené protlačovací zkoušce se na jednotlivých vzorcích oceli 11 416 nelišila. Všechny vzorky byly porušeny transkrystalickým tvárným lomem. Na obr. 46 je fotografie porušeného vzorku. Detail povrchu s výraznými řádky způsobenými řádkovitou strukturou je na obr. 47. Detail lomové plochy vzorku je na obr. 48.



Obr. 46 Fotografie porušeného vzorku oceli 11 416, zvětšeno 40x

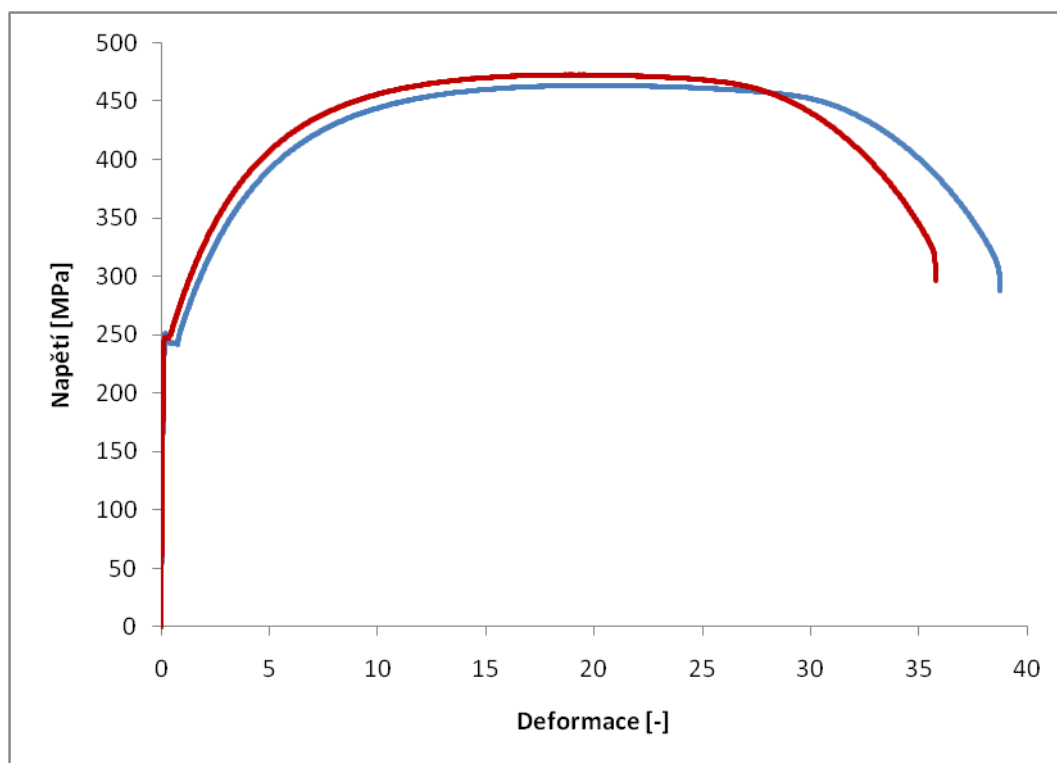


Obr. 47 Detail povrchu vzorku oceli 11 416, zvětšeno 250x



Obr. 48 Detail tvárné lomové plochy oceli 11 416, zvětšeno 2000x

Graf závislosti napětí deformace pro 2 tahové vzorky oceli 11 416 je vykreslen na obr. 49. Z grafu je vidět, že ocel 11 416 má mez kluzu výraznou.



Obr. 49 Graf závislosti napětí deformace ocel 11 416

Výsledky tahových zkoušek na hladkých tyčích z oceli 11 416 jsou v tabulce 29. Hodnoty postupně získané ze závislosti síla - posunutí a vstupní data experimentu jsou zpracovány v tabulce 30.

Tabulka 29 Výsledky tahových zkoušek oceli 11 416 provedených za pokojové teploty.

zkušební těleso	teplota	mez kluzu	mez pevnosti	tažnost	zúžení celkové	skutečné napětí na mezi pevnosti	skutečná deformace na mezi pevnosti	lomová deformace
	t	R_e	R_m	A	Z	σ_m	ϵ_{pn}	ϵ_u
	[°C]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]	[%]	[%]
O3	20	242	463	40,38	69,68	595	0,2504	1,1935
O10	20	247	427	37,57	67,60	578	0,2011	1,1270
O11	20	246	466	38,88	68,29	574	0,2104	1,1486
průměr	20	245	467	38,94	68,52	582	0,221	1,156

Tabulka 30 Výsledky protlačovacích zkoušek na miniaturních discích oceli 11 416 provedených za pokojové teploty.

Ocel 11 416		označení tělesa		1	2	3	4	5	6	7	průměrné hodnoty
		veličina	jednotka	O7_01	O7_02	O7_03	O7_04	O7_05	O7_06	O7_07	
teplota		t	[°C]	20	20	20	20	20	20	20	20
počáteční tloušťka vzorku		h ₀	[mm]	0,499	0,501	0,501	0,500	0,500	0,498	0,500	0,500
posunutí při max. zatížení		u _m	[mm]	1,896	1,884	1,920	1,997	1,935	1,906	1,932	1,924
síla F _e		F _e	[N]	183	163	165	225	172	182	180	181
síla F _m		F _m	[N]	1404	1422	1431	1478	1462	1466	1503	1452
lomová energie		E ^{SP}	[J]	2,022	2,036	2,009	2,133	2,028	2,045	2,123	2,057
SMLUVNÍ METODA											
mez kluzu	Guan, Wang	R _e	[MPa]	378	336	340	458	355	377	370	373
	Mao, Takahashi	R _e	[MPa]	265	234	237	324	248	264	259	261
mez pevnosti	Guan, Wang	R _m	[MPa]	522	523	526	540	536	540	546	533
	Mao, Takahashi	R _m	[MPa]	413	416	421	449	440	448	462	436
METODA DVOU TEČEN											
mez kluzu	Guan, Wang	R _e	[MPa]	271	269	273	313	278	289	285	283
	Mao, Takahashi	R _e	[MPa]	186	184	187	216	190	199	196	194
mez pevnosti	Guan, Wang	R _m	[MPa]	522	523	526	540	536	540	546	533
	Mao, Takahashi	R _m	[MPa]	413	416	421	449	440	448	462	436

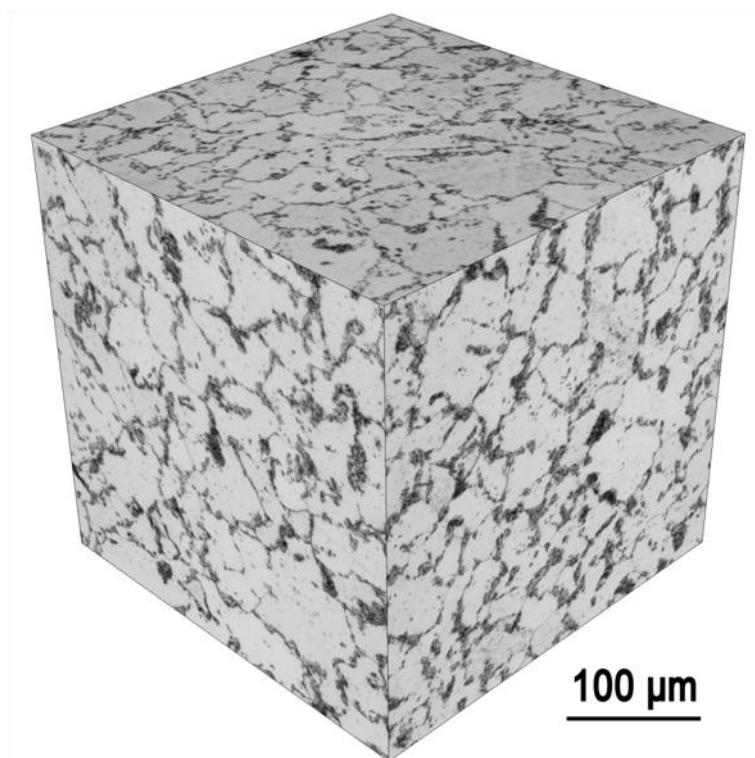
V následující tabulce (tabulka 31) jsou pro porovnání shrnuty výsledky konvenční tahové zkoušky a protlačovací zkoušky na miniaturních discích.

Tabulka 31 Souhrnná tabulka výsledků tahové a protlačovací zkoušky oceli 11 416.

11 416		Tahová zkouška		Protlačovací zkouška							
		μ	σ	smluvní metoda				metoda dvou tečen			
				GW		MT		GW		MT	
				μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
mez kluzu	[MPa]	245	2,2	373	38	261	28	283	14	194	11
mez pevnosti	[MPa]	467	17,7	533	9	436	17	533	9	436	17

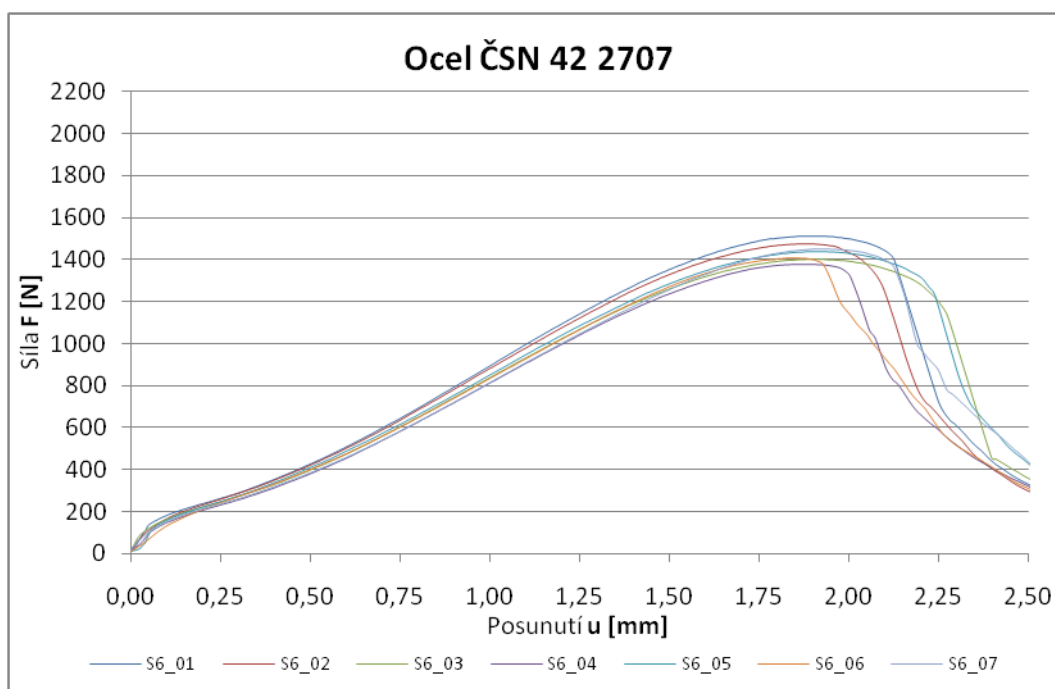
5.1.5 Ocel ČSN 42 2707

Struktura oceli 42 2707 je tvořena směsí feritu a bainitu (obr. 50). Průměrná velikost zrna je přibližně 50 μm .



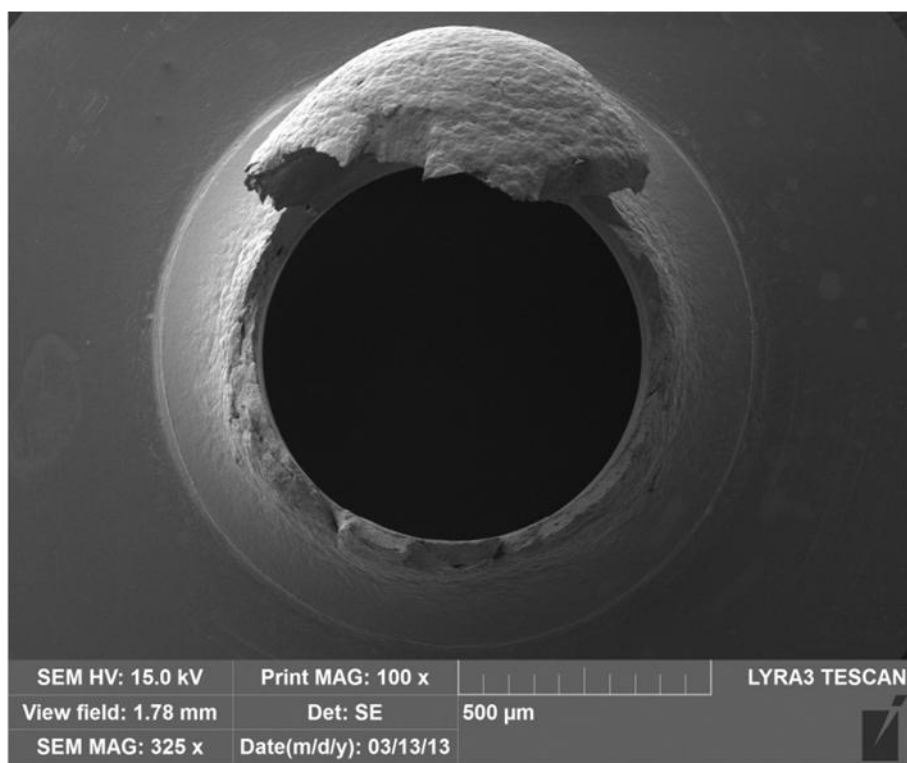
Obr. 50 3D struktura oceli ČSN 42 2702

Záznamem zkoušek jsou grafy závislosti síla - posunutí. Pro porovnání výsledků jednotlivých zkoušek byly záznamy vloženy do jednoho grafu na obr. 51.

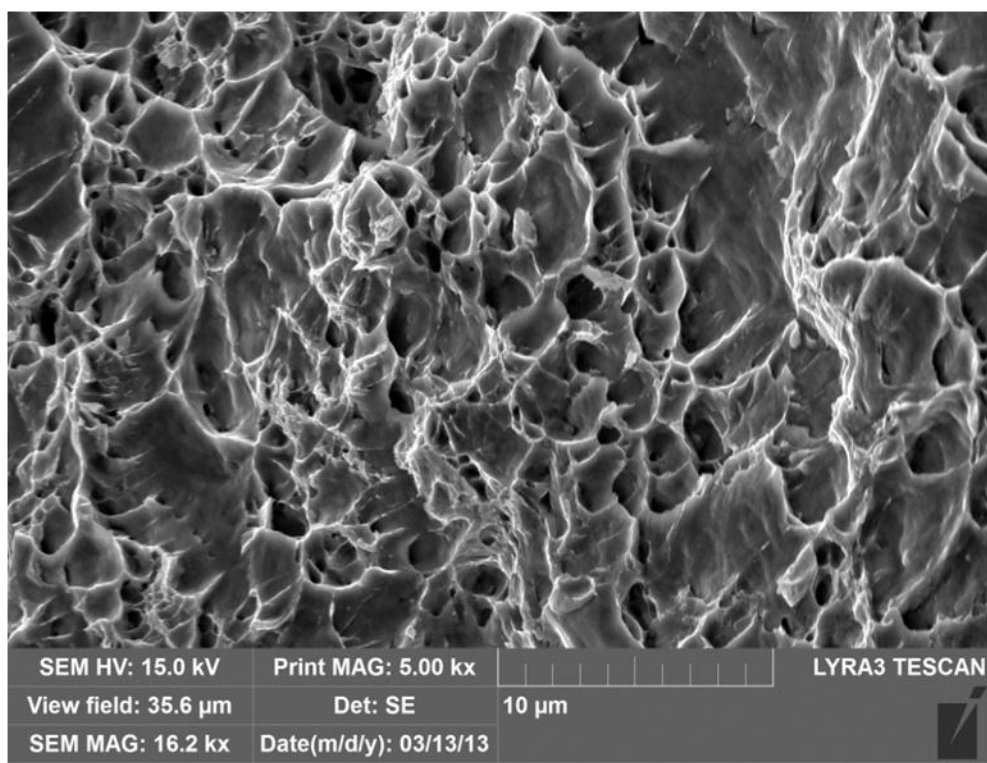


Obr. 51 Závislost síla - posunutí pro všech 7 zkušebních vzorků oceli 42 2707

Lomová plocha disků po ukončené protlačovací zkoušce se na jednotlivých vzorcích oceli 42 2707 nelišila. Všechny vzorky byly porušeny transkrystalickým tvárným lomem. Na obr. 52 je fotografie porušeného vzorku. Detail lomové plochy vzorku je na obr. 53.

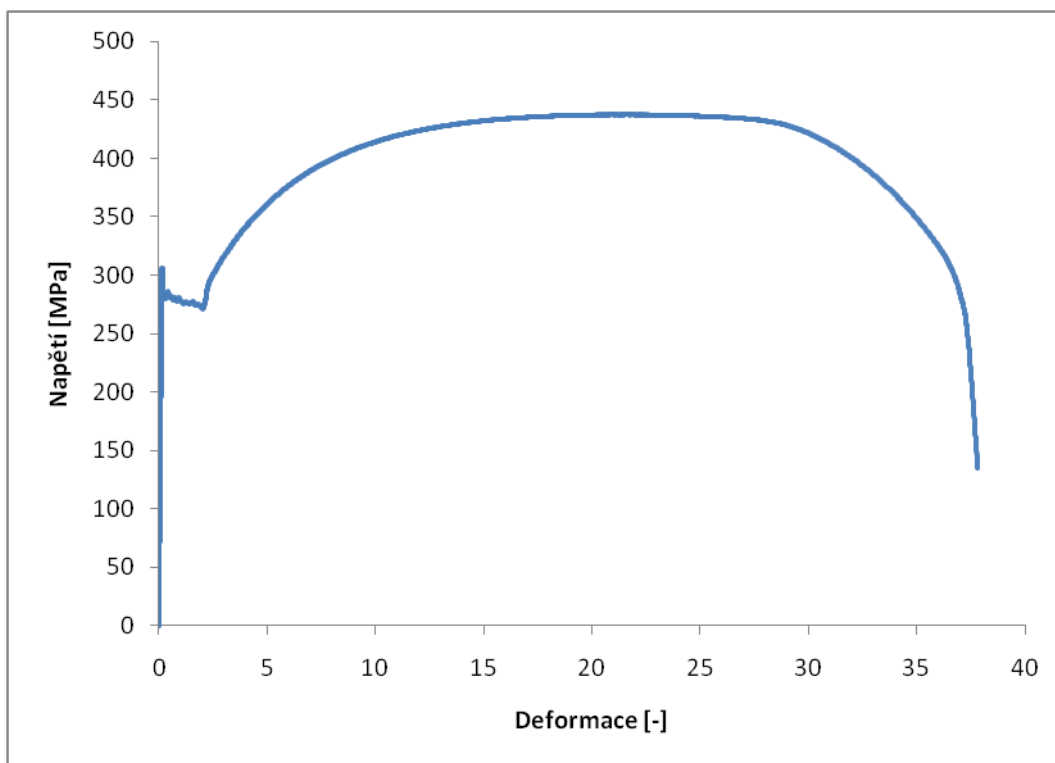


Obr. 52 Fotografie porušeného vzorku oceli 42 2707, zvětšeno 40x



Obr. 53 Detail tvárné lomové plochy oceli 42 2707, zvětšeno 5000x

Graf závislosti napětí deformace pro 1 tahový vzorek oceli 42 2707 je vykreslen na obr. 54. Také ocel 42 2707 je ocel s výraznou mezí kluzu.



Obr. 54 Graf závislosti napětí deformace ocel 42 2707

Výsledky tahových zkoušek na hladkých tyčích z oceli 42 2707 jsou v tabulce 32. Hodnoty postupně získané ze závislosti síla - posunutí a vstupní data experimentu jsou zpracovány v tabulce 33.

Tabulka 32 Výsledky tahových zkoušek oceli 42 2707 provedených za pokojové teploty.

zkušební těleso	teplota	mez kluzu	mez pevnosti	tažnost	zúžení celkové	skutečné napětí na mezi pevnosti	skutečná deformace na mezi pevnosti	lomová deformace
	t	R_e	R_m	A	Z	σ_m	ε_{pn}	ε_u
	[°C]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]	[%]	[%]
S3	20	271	437	37,99	72,92	535	0,2009	1,3065
průměr	20	271	437	37,99	72,92	535	0,201	1,307

Tabulka 33 Výsledky protlačovacích zkoušek na miniaturních discích oceli 42 2707 provedených za pokojové teploty.

Ocel 42 2707		označení tělesa		1	2	3	4	5	6	7	průměrné hodnoty
		veličina	jednotka	S6_01	S6_02	S6_03	S6_04	S6_05	S6_06	S6_07	
teplota	t	[°C]		20	20	20	20	20	20	20	20
počáteční tloušťka vzorku	h_0	[mm]		0,501	0,502	0,498	0,498	0,500	0,501	0,498	0,500
posunutí při max. zatížení	u_m	[mm]		1,900	1,879	1,897	1,873	1,924	1,857	1,915	1,892
síla F_e	F_e	[N]		200	193	160	180	193	226	178	190
síla F_m	F_m	[N]		1514	1478	1404	1378	1436	1410	1453	1439
lomová energie	E^{sp}	[J]		2,083	1,935	2,124	1,635	2,060	1,650	1,881	1,910
SMLUVNÍ METODA											
mez kluzu	Guan, Wang	R_e	[MPa]	408	393	334	373	396	458	369	390
	Mao, Takahashi	R_e	[MPa]	287	276	232	261	278	324	258	274
mez pevnosti	Guan, Wang	R_m	[MPa]	548	537	523	516	529	520	536	530
	Mao, Takahashi	R_m	[MPa]	464	442	416	402	427	410	442	429
METODA DVOU TEČEN											
mez kluzu	Guan, Wang	R_e	[MPa]	352	325	295	307	318	341	311	321
	Mao, Takahashi	R_e	[MPa]	245	226	203	212	220	237	215	223
mez pevnosti	Guan, Wang	R_m	[MPa]	548	537	523	516	529	520	536	530
	Mao, Takahashi	R_m	[MPa]	464	442	416	402	427	410	442	429

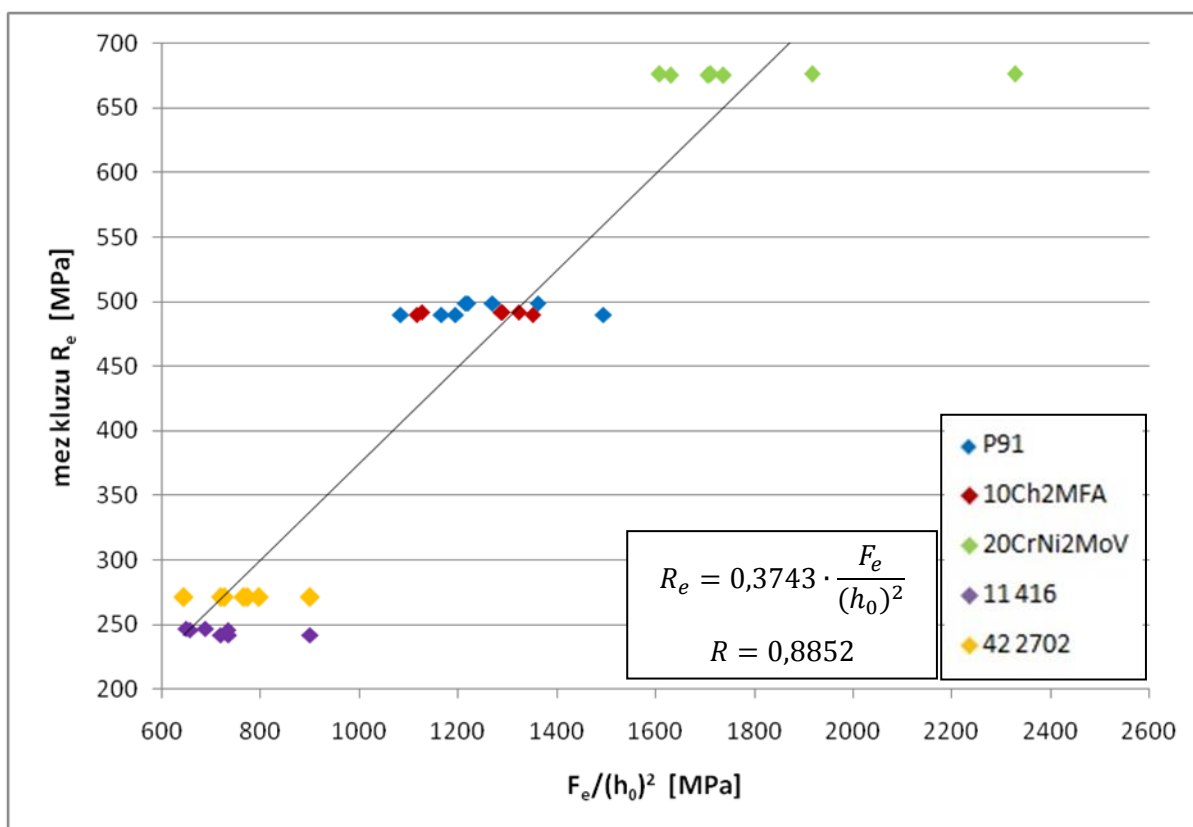
V následující tabulce (tabulka 34) jsou pro porovnání shrnuty výsledky konvenční tahové zkoušky a protlačovací zkoušky na miniaturních discích.

Tabulka 34 Souhrnná tabulka výsledků tahové a protlačovací zkoušky oceli 42 2707.

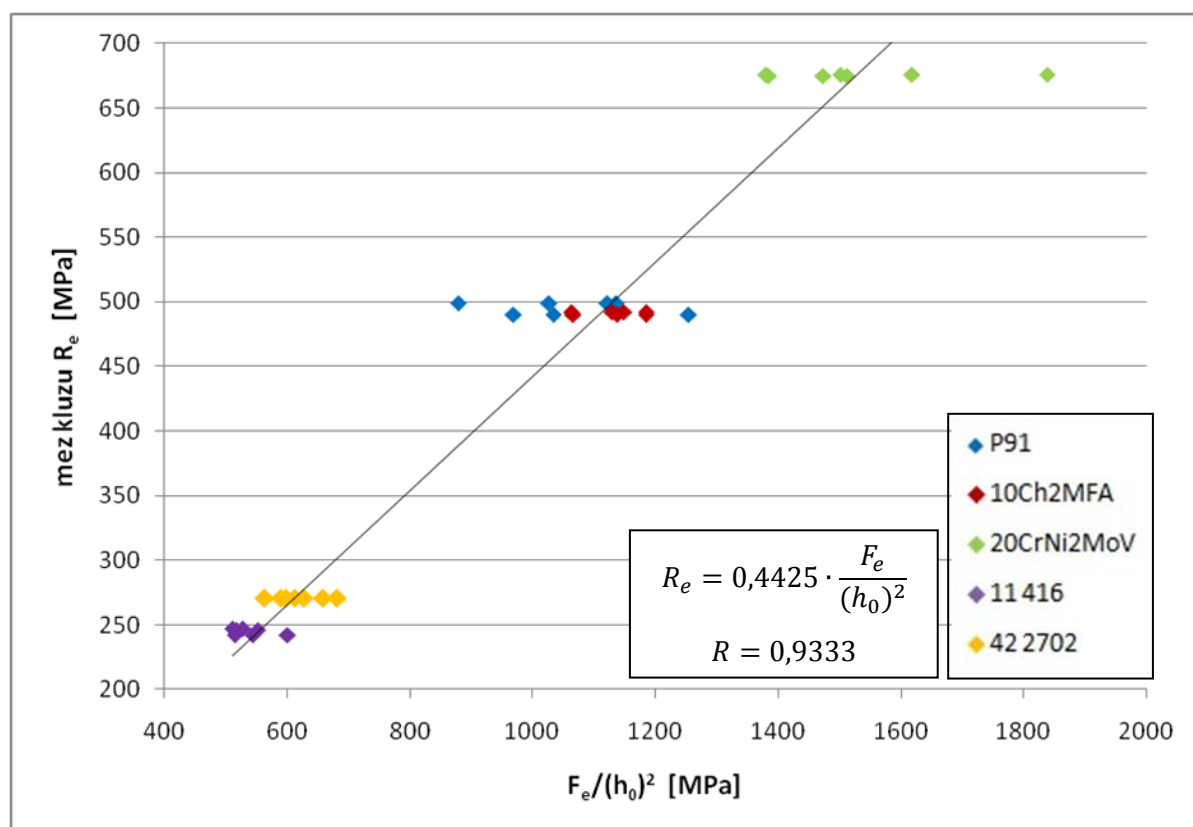
42 2707		Tahová zkouška		Protlačovací zkouška							
		μ	σ	smluvní metoda				metoda dvou tečen			
				GW		MT		GW		MT	
				μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
mez kluzu	[MPa]	271	0,0	390	35	274	26	321	18	223	14
mez pevnosti	[MPa]	437	0,0	530	10	429	20	530	10	429	20

5.1.6 Korelační závislosti

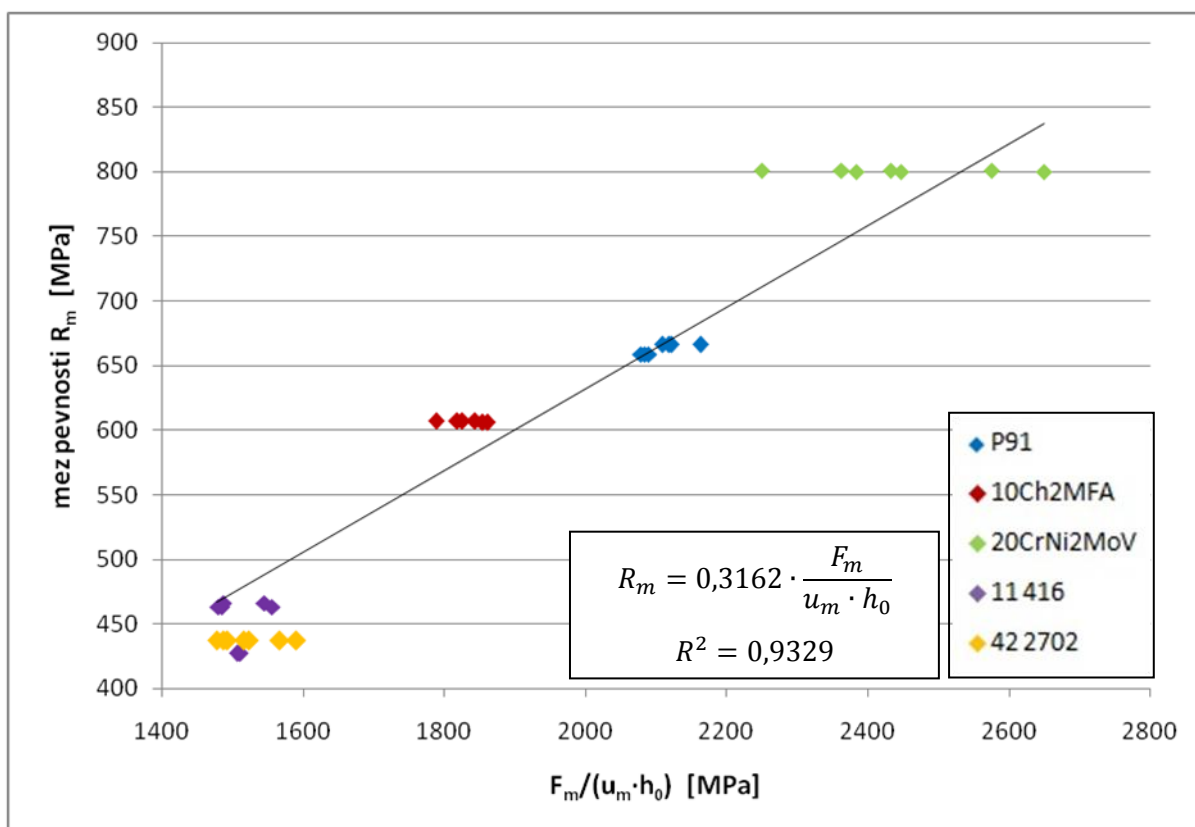
Pro upravený creepový přístroj, na kterém byly prováděny protlačovací zkoušky na miniaturních discích byly vytvořeny vztahy pro výpočet meze kluzu R_e a meze pevnosti R_m . Jako vstupní data pro výpočet byly použity výsledky všech zkoušek provedených na daném upraveném creepovém stroji a hodnoty meze kluzu R_e a meze pevnosti R_m získané konvenčními tahovými zkouškami. Pro výpočet meze kluzu R_e byly stanoveny 2 vztahy. První vztah využívá hodnotu síly F_e stanovenou smluvní metodou, druhý vztah obsahuje sílu F_e získanou metodou dvou tečen. Grafické znázornění závislosti je na obr. 55 – 57. Získané vztahy jsou označeny jako rovnice 16 – 18. Podle získaných vztahů byla vypočtena napětí na mezi kluzu R_e a na mezi pevnosti R_m (tabulka 35), Získané rovnice 16 – 18 platí pouze pro upravený creepový stroj, na kterém byly zkoušky prováděny.



Obr. 55 Korelační závislost meze kluzu R_e získané konvenční tahovou zkouškou na síle F_e stanovené smluvní metodou a počáteční tloušťce vzorku h_0



Obr. 56 Korelační závislost meze kluzu R_e získané konvenční tahovou zkouškou na síle F_e stanovené metodou dvou tečen a počáteční tloušťce vzorku h_0



Obr. 57 Korelační závislost meze pevnosti R_m získané konvenční tahovou zkouškou na síle F_m , posunutí při maximální síle u_m a počáteční tloušťce vzorku h_0

Výsledný vztah pro výpočet meze kluzu ze síly určené smluvní metodou (rovnice 16):

$$R_e = 0,3743 \cdot \frac{F_e}{(h_0)^2} \quad (16)$$

Výsledný vztah pro výpočet meze kluzu ze síly určené metodou dvou tečen (rovnice 17):

$$R_e = 0,4425 \cdot \frac{F_e}{(h_0)^2} \quad (17)$$

Výsledný vztah pro výpočet meze pevnosti z nejvyšší síly záznamu protlačovací zkoušky (rovnice 18):

$$R_m = 0,9329 \cdot \frac{F_m}{u_m \cdot h_0} \quad (18)$$

Tabulka 35 Tabulka vypočtených hodnot meze kluzu a meze pevnosti podle rovnic 16 – 18.

	Vzorek	Mez kluzu [MPa]		Mez pevnosti [MPa]		Vzorek	Mez kluzu [MPa]		Mez pevnosti [MPa]
		SM	DT				SM	DT	
Ocel P91	H8_01	457	503	684	Ocel 10Ch2MFA	J11_1	482	508	565
	H8_02	559	555	657		J11_2	418	472	588
	H8_03	475	454	670		J11_3	422	470	575
	H8_04	406	429	659		J11_4	506	524	586
	H8_05	455	389	667		J11_5	495	524	583
	H8_06	436	458	661		J11_6	447	503	586
	H8_07	509	496	671		J11_7	483	500	577
	μ	471	469	667		μ	464	500	580
	σ	47	50	8		σ	33	21	8
Ocel 20CrNi2MoV	M15_01	602	611	814	Ocel 11 416	O7_01	275	228	469
	M15_02	638	652	774		O7_02	243	226	476
	M15_03	717	716	769		O7_03	246	229	470
	M15_04	650	669	838		O7_04	337	266	468
	M15_05	871	813	711		O7_05	258	234	478
	M15_06	610	612	754		O7_06	275	245	488
	M15_07	641	664	747		O7_07	269	241	492
	μ	676	677	772		μ	272	238	477
	σ	87	65	39		σ	29	13	9
Ocel 42 2707	S6_01	298	301	503					
	S6_02	287	278	495					
	S6_03	241	249	470					
	S6_04	272	261	467					
	S6_05	289	271	472					
	S6_06	337	291	479					
	S6_07	269	265	482					
	μ	285	274	481					
	σ	27	17	12					

kde SM je smluvní metoda: k výpočtu je použita síla F_e určená smluvní metodou
DT je metoda dvou tečen: k výpočtu je použita síla F_e určená metodou dvou tečen

5.2 Teplotní závislosti

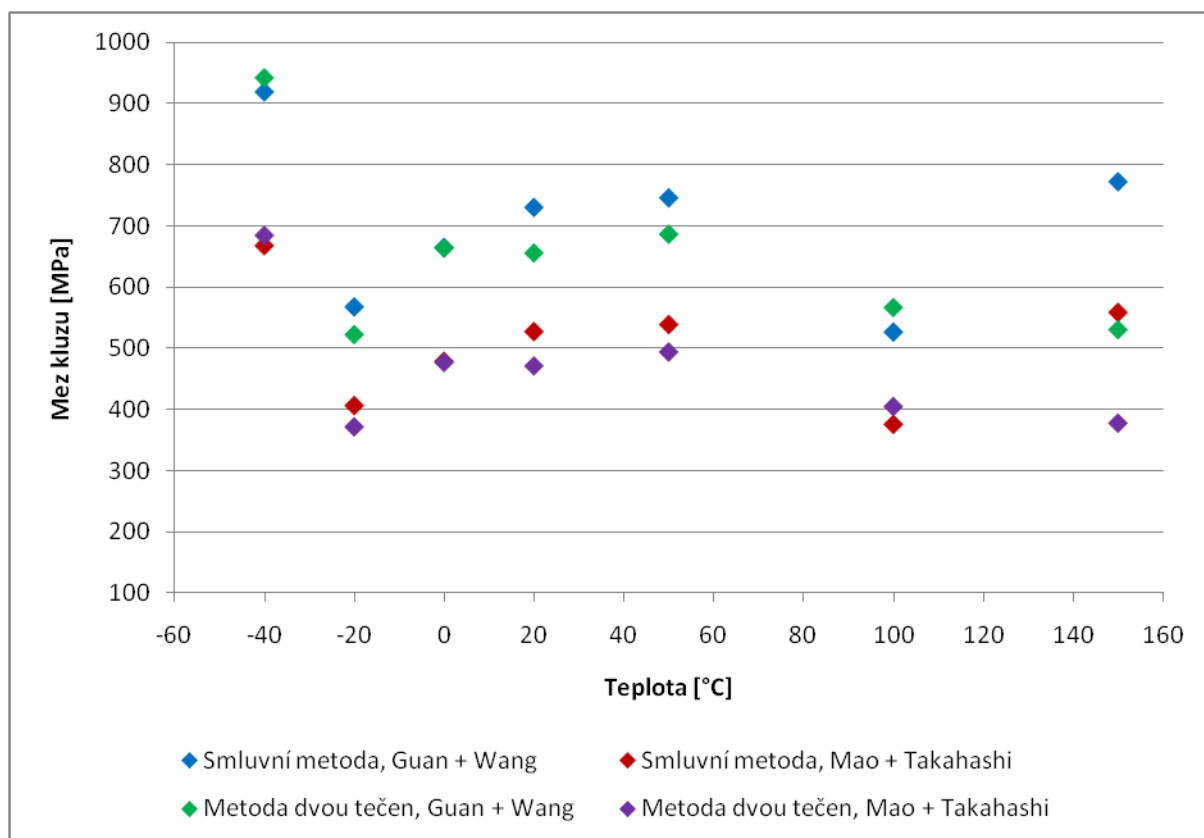
Pro provedení protlačovacích zkoušek na miniaturních discích za účelem získání teplotní závislosti bylo použito 7 vzorků dvou druhů ocelí (P91 a 42 2707). Zkoušky byly provedeny při teplotách: -40 °C, -20 °C, 0 °C, +50 °C, +100 °C a +150 °C. Výsledky tahových zkoušek byly převzaty z disertační práce Ing. Zdeňka Chlupa, Ph.D. [56]. Výsledky protlačovacích zkoušek a jejich hodnocení je uvedeno v následujících podkapitolách. Pro vyhodnocení experimentů provedených při 150 °C musela být použita data z příčnicku, protože fixace extenzometru neodolala teplotní expozici.

5.2.1 Ocel P91

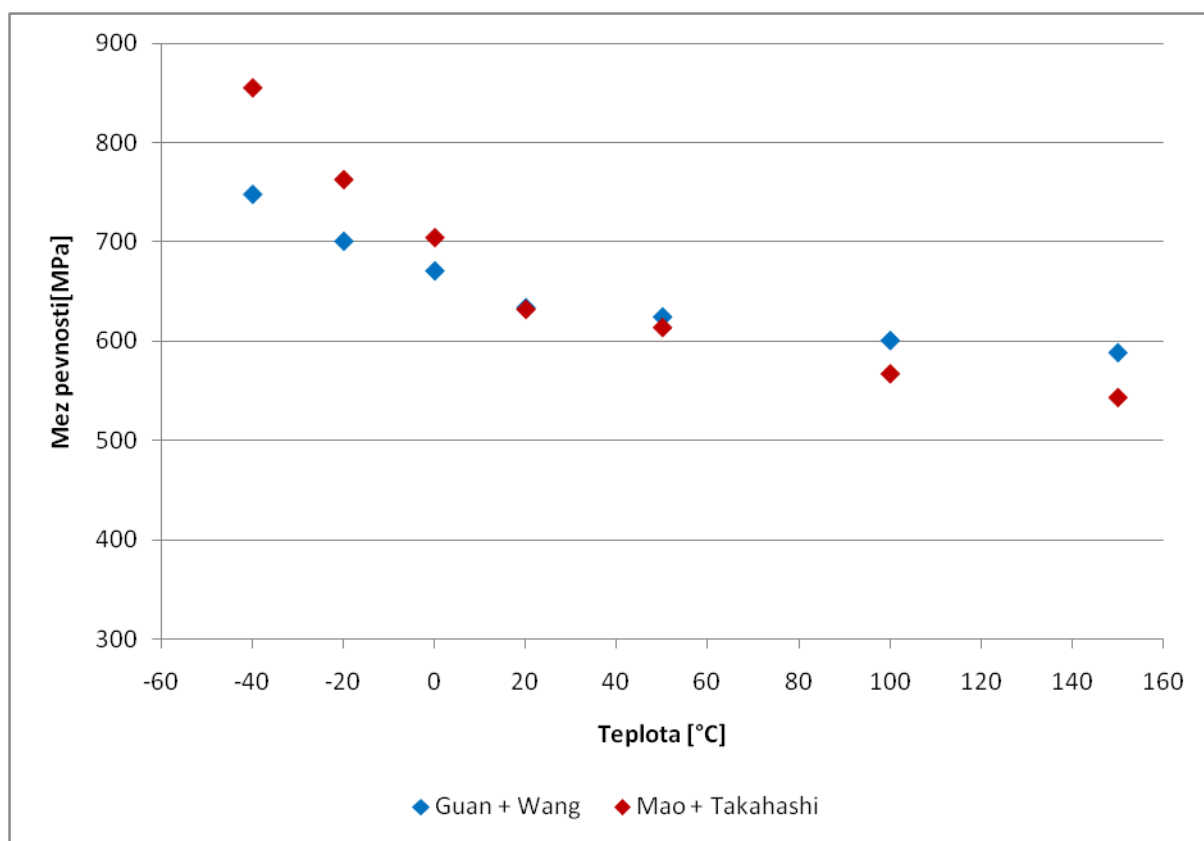
Ze záznamů síla - posunutí byly pomocí korelačních vztahů (rovnice 1 – 4) převzatých z literatury vypočteny hodnoty meze kluzu a meze pevnosti. Síla F_e potřebná pro výpočet meze kluzu byla získána jednak smluvní metodou, jednak metodou dvou tečen. Výsledky těchto protlačovacích zkoušek na miniaturních discích jsou v tabulce 36. Graficky jsou znázorněny na obr. 58 a 59.

Tabulka 36 Teplotní závislost meze kluzu a meze pevnosti oceli P91 získaná protlačovacími zkouškami.

SMLUVNÍ METODA			H8_08	H8_10	H8_11	H8_12	H8_13	H8_14	H8_15
teplota		t [°C]	20	-40	-20	0	50	100	150
mez kluzu	Guan, Wang	R_e [MPa]	731	920	568	666	746	527	773
	Mao, Takahashi	R_e [MPa]	527	667	406	479	539	376	558
mez pevnosti	Guan, Wang	R_m [MPa]	634	748	701	671	624	600	588
	Mao, Takahashi	R_m [MPa]	632	855	762	704	613	567	543
METODA DVOU TEČEN									
mez kluzu	Guan, Wang	R_e [MPa]	655	942	522	663	686	566	530
	Mao, Takahashi	R_e [MPa]	471	684	372	477	494	405	378
mez pevnosti	Guan, Wang	R_m [MPa]	634	748	701	671	624	600	588
	Mao, Takahashi	R_m [MPa]	632	855	762	704	613	567	543



Obr. 58 Teplotní závislost meze kluzu oceli P91 z protlačovacích zkoušek



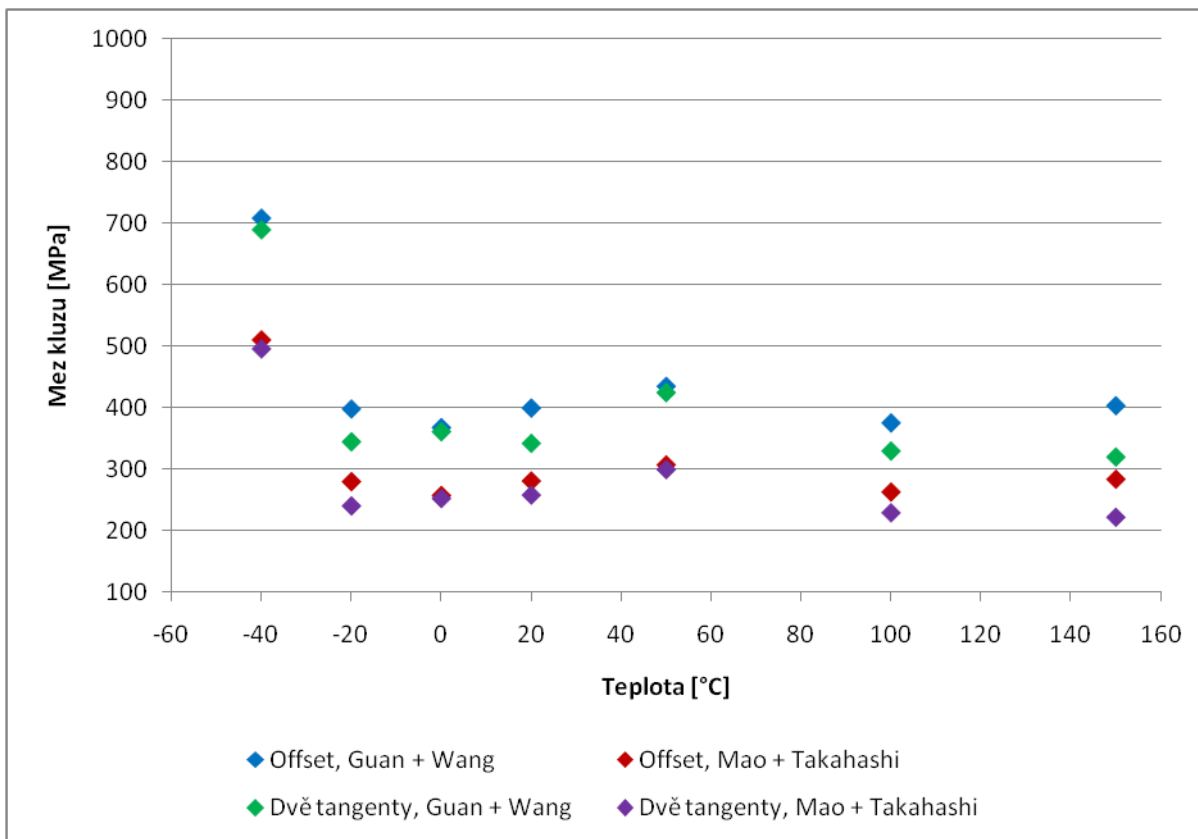
Obr. 59 Teplotní závislost meze pevnosti oceli P91 z protlačovacích zkoušek

5.2.2 Ocel ČSN 42 2707

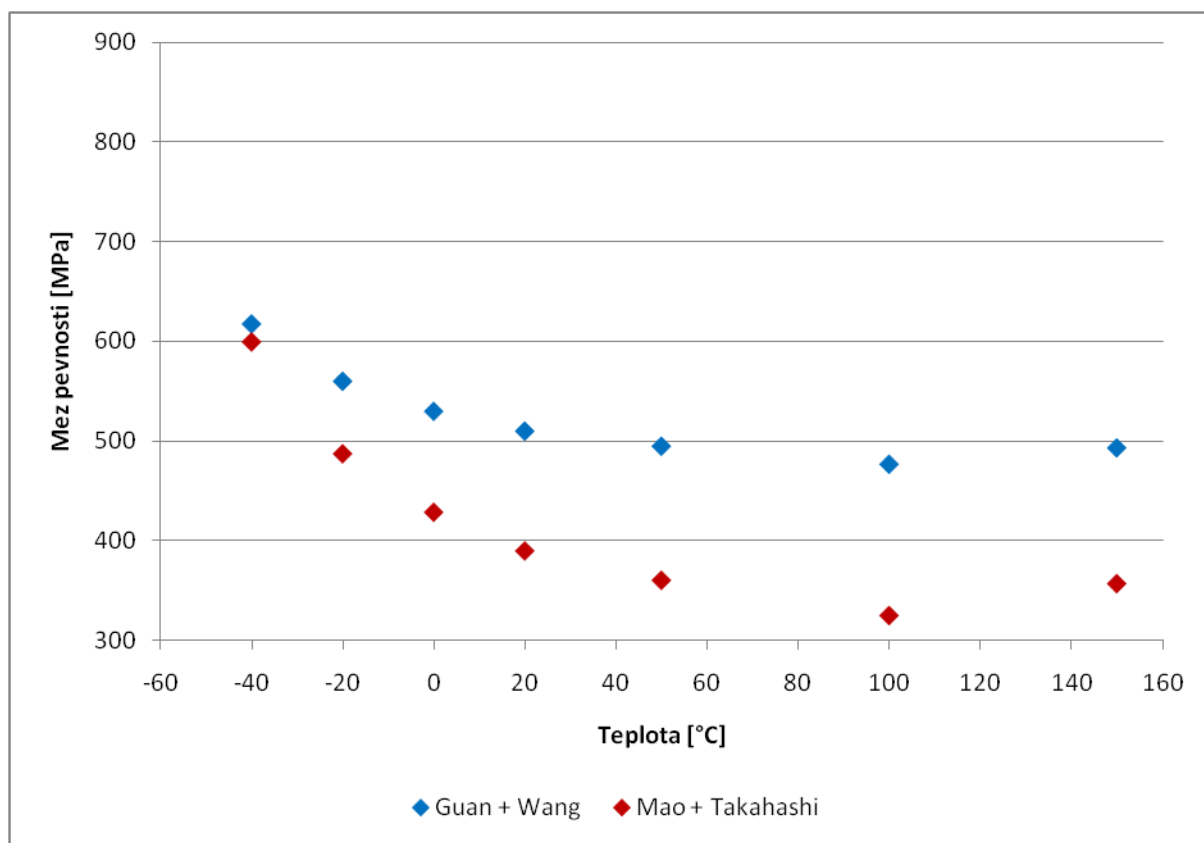
Stejným způsobem jako u oceli P91 byly získány hodnoty meze kluzu a meze pevnosti oceli 42 2707. Výsledky těchto protlačovacích zkoušek na miniaturních discích oceli 42 2707 jsou v tabulce 37. Graficky jsou znázorněny na obr. 60 a 61.

Tabulka 37 Teplotní závislost meze kluzu a meze pevnosti oceli 42 2707 získaná protlačovacími zkouškami.

SMLUVNÍ METODA				S6_08	S6_10	S6_11	S6_12	S6_14	S6_15	S6_16
teplota		t	[°C]	20	-40	-20	0	50	100	150
mez kluzu	Guan, Wang	R _e	[MPa]	399	709	398	368	435	375	403
	Mao, Takahashi	R _e	[MPa]	281	511	280	257	307	263	284
mez pevnosti	Guan, Wang	R _m	[MPa]	509	617	559	529	494	476	493
	Mao, Takahashi	R _m	[MPa]	389	599	487	428	360	324	356
METODA DVOU TEČEN										
mez kluzu	Guan, Wang	R _e	[MPa]	343	690	345	362	425	330	320
	Mao, Takahashi	R _e	[MPa]	258	497	241	253	300	229	222
mez pevnosti	Guan, Wang	R _m	[MPa]	536	617	559	529	494	476	493
	Mao, Takahashi	R _m	[MPa]	389	599	487	428	360	324	356



Obr. 60 Teplotní závislost meze kluzu oceli 422707 z protlačovacích zkoušek



Obr. 61 Teplotní závislost meze pevnosti oceli 422707 z protlačovacích zkoušek

6 DISKUZE

6.1 Diskuze výsledků zkoušek provedených za pokojové teploty

6.1.1 Ocel P91

Při pozorování lomové plochy nebylo nalezeno nic zvláštního. Mechanismus lomu, související s bainitickou mikrostrukturou oceli P91 (obr. 29), byl tvárný. Na lomové ploše je zřejmá jamková morfologie (obr. 32) zejména v okolí karbidických částic.

Tahová zkouška oceli P91 byla provedena na dvou vzorcích (tabulka 20). Nevýrazná mez kluzu $R_{p0,2} = 495 \pm 2$ MPa je hodnota vyšší než 450 MPa, což je minimum požadované normou. Mez kluzu tedy odpovídá normě. Mez pevnosti leží v rozsahu hodnot předepsaných normou (630 – 730 MPa). Její velikost je $R_m = 663 \pm 3,5$ MPa.

Protlačovací zkouška byla provedena na 7 miniaturních discích. Výsledky se poměrně liší v závislosti na metodě vyhodnocování a autorech vztahů pro výpočet meze kluzu R_e a meze pevnosti R_m (tabulka 21). Počáteční tloušťku vzorku v sobě všechny výpočetní vztahy zahrnují, výsledné hodnoty tedy může ovlivňovat jen minimálně. Výsledky protlačovacích zkoušek se odlišují i od výsledků tahových zkoušek (tabulka 22). Zajímavé však je, že pokud zprůměrujeme výsledky ze vztahu autorů Guana a Wanga (rovnice 3 pro mez kluzu a rovnice 4 pro mez pevnosti) s výsledky vztahu autorů Maa a Takahashiho (rovnice 1 pro mez kluzu a rovnice 2 pro mez pevnosti), vypočtené hodnoty meze kluzu se přiblíží výsledkům tahové zkoušky. Porovnání těchto výsledků pro ocel P91 je v tabulce 38. Výpočet meze kluzu R_e se řídí rovnicí 19, výpočet meze pevnosti R_m rovnicí 20. Tyto vztahy v sobě kombinují výše uvedené rovnice 1 a 3 pro získání hodnoty R_e , resp. rovnice 2 a 4 pro získání hodnoty R_m .

$$R_e (R_{p0,2}) = \frac{1}{2n} \cdot \left[\sum_{i=1}^{i=n} \left(360 \cdot \frac{F_{e_i}}{h_{0_i}^2} \right) + \sum_{i=1}^{i=n} \left(0,4847 \cdot \frac{F_{e_i}}{h_{0_i}^2} + 21,359 \right) \right], \quad (19)$$

$$R_m = \frac{1}{2n} \cdot \left[\sum_{i=1}^{i=n} \left(130 \cdot \frac{F_{m_i}}{h_{0_i}^2} - 320 \right) + \sum_{i=1}^{i=n} \left(0,0666 \cdot \frac{F_{m_i}}{h_{0_i}^2} + 146,03 \right) \right], \quad (20)$$

kde n je počet vzorků.

Tabulka 38 Porovnání výsledků meze kluzu a meze pevnosti vypočtených podle rovnic 19 a 20 s výsledky hodnot tahové zkoušky pro ocel P91.

Ocel P91			Smluvní metoda		Metoda dvou tečen		Tahová zkouška	
			μ	σ	μ	σ	μ	σ
mez kluzu	R_e	[MPa]	547	109	460	93	495	2
mez pevnosti	R_m	[MPa]	671	16	671	16	663	3,5

Směrodatná odchylka meze kluzu je poměrně velká, a to z důvodu velkého rozsahu hodnot zahrnutých do výpočtu. U smluvní metody je rozsah hodnot od 390 do 780 MPa a u metody dvou tečen je rozsah od 317 do 644 MPa.

Nejvíce se výsledkům tahové zkoušky v případě meze pevnosti blíží hodnota 660 MPa vypočtená podle Guana a Wanga (rovnice 4). Mezi kluzu získané tahovou zkouškou se

naopak nejvíce blíží průměr hodnot podle rovnice 19, se silou F_e určenou pomocí metody dvou tečen.

6.1.2 Ocel 10Ch2MFA

Při pozorování lomové plochy nebylo ani u oceli 10Ch2MFA nalezeno nic zvláštního. Mechanismus lomu, související s bainitickou mikrostrukturou oceli 10Ch2MFA (obr. 34), byl opět tvárný. Na lomové ploše je zřejmá jamková morfologie (obr. 37) zejména v okolí karbidických částic.

Také tahová zkouška oceli 10Ch2MFA byla provedena na dvou vzorcích (tabulka 23). Nevýrazná mez kluzu $R_{p0,2} = 491 \pm 1$ MPa je hodnota vyšší než 431 MPa, což je minimum požadované normou. Proto mez kluzu odpovídá normě. Mez pevnosti leží v rozsahu hodnot předepsaných normou (539 – 735 MPa). Její velikost je $R_m = 606 \pm 0,5$ MPa. Obě mechanické charakteristiky normě odpovídají.

Protlačovací zkouška byla provedena na 7 miniaturních discích. Výsledky (tabulky 24 a 25) se liší mezi sebou i od výsledků tahové zkoušky. Mez pevnosti vypočtená podle dvojice Mao, Takahashi (rovnice 1) dokonce nevyhovuje normě. Pokud pro výpočet použijeme rovnice 19 a 20, získáme výsledky zapsané v tabulce 39.

Tabulka 39 Porovnání výsledků meze kluzu a meze pevnosti vypočtených podle rovnic 19 a 20 s výsledky hodnot tahové zkoušky pro ocel 10Ch2MFA.

Ocel 10Ch2MFA			Smluvní metoda		Metoda dvou tečen		Tahová zkouška	
			μ	σ	μ	σ	μ	σ
mez kluzu	R_e	[MPa]	535	96	488	84	491	1
mez pevnosti	R_m	[MPa]	547	32	547	32	607	0,5

Směrodatná odchylka meze kluzu je opět poměrně velká. U smluvní metody je rozsah hodnot od 402 do 676 MPa a u metody dvou tečen je rozsah od 383 do 596 MPa.

Nejvíce se výsledkům tahové zkoušky v případě meze pevnosti blíží hodnota 575 MPa vypočtená podle Guana a Wanga (vztah 4). Mezi kluzu získané tahovou zkouškou se naopak nejvíce blíží průměr hodnot podle vztahu 19, se silou F_e určenou pomocí metody dvou tečen.

6.1.3 Ocel 20CrNi2MoV

Stejně jako u předchozích 2 ocelí nebylo ani u oceli 20CrNi2MoV na lomové ploše nalezeno nic zvláštního. Mechanismus lomu, související s bainitickou mikrostrukturou oceli 20CrNi2MoV (obr. 39), byl tvárný. Na lomové ploše je zřejmá jamková morfologie (obr. 42) zejména v okolí karbidických částic.

Tahová zkouška oceli 20CrNi2MoV byla provedena na dvou vzorcích (tabulka 26). Nevýrazná mez kluzu $R_{p0,2} = 676 \pm 1$ MPa, velikost meze pevnosti je $R_m = 801 \pm 1$ MPa. Vzhledem k nedostupnosti normy nelze tyto hodnoty srovnat s předepsanými.

Protlačovací zkouška byla provedena na 7 miniaturních discích. Výsledky (tabulky 27 a 28) se liší mezi sebou i od výsledků tahové zkoušky. Pokud pro výpočet použijeme rovnice 19 a 20, získáme výsledky zapsané v tabulce 40.

Tabulka 40 Porovnání výsledků meze kluzu a meze pevnosti vypočtených podle rovnic 19 a 20 s výsledky hodnot tahové zkoušky pro ocel 20CrNi2MoV.

Ocel 20CrNi2MoV			Smluvní metoda		Metoda dvou tečen		Tahová zkouška	
			μ	σ	μ	σ	μ	σ
mez kluzu	R_e	[MPa]	773	158	657	123	676	0,5
mez pevnosti	R_m	[MPa]	737	34	737	34	801	0,5

Směrodatná odchylka meze kluzu je opět poměrně velká. U smluvní metody je rozsah hodnot od 579 do 1150 MPa a u metody dvou tečen je rozsah od 497 do 912 MPa.

Vypočtené hodnoty meze pevnosti v případě počítání podle dvojice Guan, Wang a ani podle dvojice Mao, Takahashi nedosahují hodnot získaných tahovou zkouškou. Jejich průměr tedy také s výsledem tahové zkoušky nesouhlasí. Mezi kluzu získané tahovou zkouškou se nejvíce blíží průměr hodnot podle rovnice 19, se silou F_e určenou pomocí metody dvou tečen.

6.1.4 Ocel 11 416

Na lomové ploše oceli 11 416 (obr. 48) jsou jasně vidět oblasti feritu a perlitu ve struktuře (obr. 44). Mechanismus lomu je, stejně jako v předchozích případech, tvárný.

Tahová zkouška oceli 11 416 byla provedena na třech vzorcích (tabulka 29). Mez kluzu $R_e = 245 \pm 2,2$ MPa je hodnota vyšší než 225 MPa, což je minimum požadované normou. Mez kluzu tedy odpovídá požadavkům normy. Mez pevnosti leží v rozsahu hodnot předepsaných normou (400 – 490 MPa). Její velikost je $R_m = 467 \pm 17,7$ MPa.

Protlačovací zkouška byla provedena na 7 miniaturních discích. Její výsledky se odlišují vzájemně (tabulka 30) i od výsledků tahových zkoušek (tabulka 31). Pokud pro výpočet meze kluzu použijeme rovnici 19 a pro výpočet meze pevnosti rovnici 20, získáme hodnoty uvedené v tabulce 41.

Tabulka 41 Porovnání výsledků meze kluzu a meze pevnosti vypočtených podle rovnic 19 a 20 s výsledky hodnot tahové zkoušky pro ocel 11 416.

Ocel 11 416			Smluvní metoda		Metoda dvou tečen		Tahová zkouška	
			μ	σ	μ	σ	μ	σ
mez kluzu	R_e	[MPa]	317	65	238	46	245	2,2
mez pevnosti	R_m	[MPa]	484	51	484	51	452	17,7

I v tomto případě je směrodatná odchylka meze kluzu poměrně velká. U smluvní metody je rozsah hodnot meze kluzu od 234 do 458 MPa a u metody dvou tečen je rozsah od 184 do 313 MPa.

Vypočtené hodnoty meze pevnosti neodpovídají výsledkům tahové zkoušky a to ani v případě počítání podle dvojice Guan, Wang, ani podle dvojice Mao, Takahashi. Jejich průměr ale také s výsledem tahové zkoušky nesouhlasí. Mez kluzu podle rovnice 19 se silou F_e určenou pomocí metody dvou tečen, je opět hodnota nejbližší hodnotě získané tahovou zkouškou.

6.1.5 Ocel ČSN 42 2707

Na lomové ploše 42 2707 nebylo nalezeno nic zvláštního, je zde zřejmá jamková morfologie tvárného lomu (obr. 53). Mechanismus lomu je v souladu s předpoklady souvisejícími s pozorováním mikrostruktury oceli 42 2707, která je tvořena směsí feritu a bainitu (obr. 50).

Tahová zkouška oceli 42 2707 byla provedena na jednom vzorku (tabulka 32). Mez kluzu $R_e = 271 \pm 0$ MPa je hodnota vyšší než 250 – 270 MPa, což je minimum požadované normou. Mez kluzu proto odpovídá požadavkům normy. Mez pevnosti také odpovídá požadavkům normy, protože leží v rozsahu hodnot 420 – 570 MPa. Její velikost je $R_m = 437 \pm 0$ MPa.

Protlačovací zkouška byla provedena na 7 miniaturních discích. Její výsledky se odlišují vzájemně (tabulka 33) i od výsledků tahových zkoušek (tabulka 34). Výpočtem meze kluzu podle rovnice 19 a meze pevnosti podle rovnice 20 získáme hodnoty uvedené v tabulce 42.

Tabulka 42 Porovnání výsledků meze kluzu a meze pevnosti vypočtených podle rovnic 19 a 20 s výsledky hodnot tahové zkoušky pro ocel 42 2707.

Ocel 42 2707			Smluvní metoda		Metoda dvou tečen		Tahová zkouška	
			μ	σ	μ	σ	μ	σ
mez kluzu	R_e	[MPa]	332	66	272	52	242	0
mez pevnosti	R_m	[MPa]	479	53	479	53	463	0

Stejně jako u všech ostatních ocelí je směrodatná odchylka meze kluzu poměrně velká. U smluvní metody je rozsah hodnot meze kluzu od 232 do 458 MPa a u metody dvou tečen je rozsah od 203 do 352 MPa. U této oceli je poměrně velká také směrodatná odchylka meze pevnosti. Rozsah hodnot meze pevnosti se totiž pohybuje od 402 do 548 MPa.

Vypočtené hodnoty meze pevnosti neodpovídají výsledkům tahové zkoušky a to ani v případě počítání podle dvojice Guan, Wang, ani podle dvojice Mao, Takahashi. Ale jejich průměr, vypočtený podle rovnice 20, je výsledku tahové zkoušky blízký. Mez kluzu podle rovnice 19 se silou F_e určenou pomocí smluvní metody je nejbližší hodnotě meze kluzu získané tahovou zkouškou.

6.1.6 Navržené korelační vztahy

Porovnáním hodnot získaných výpočty podle navržených korelačních vztahů (rovnice 16 – 18) s předchozími výsledky (tabulka 43), lze získat přehled o výběru nejvhodnějšího výpočtového vztahu. Pokud by nebyly k dispozici vlastní navržené výpočtové vztahy, bylo by možné počítat se vztahy označenými jako rovnice 19 a 20, které kombinují vztahy získané z literatury (rovnice 1 – 4). Hodnoty získané pomocí rovnic 19 a 20 jsou uspořádány v tabulce 44. V tabulkách 43 a 44 jsou tmavší barvou zvýrazněny výsledky, které se nejvíce blíží tahové zkoušce.

Tabulka 43 Souhrnná tabulka všech dosažených výsledků z tahových a protlačovacích zkoušek.

				P91		10Ch2MFA		20CrNi2MoV		11 416		42 2707	
				R _e	R _m	R _e	R _m	R _e	R _m	R _e	R _m	R _e	R _m
				[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Tahová zk.		μ	495	663	491	607	676	801	245	452	242	463	
		σ	2	4	1	1	1	1	2	18	0	0	
Protlačovací zkouška	smluvní metoda	GW	μ	636	660	623	575	896	705	373	533	390	530
			σ	70	8	43	9	84	5	38	9	35	10
		MT	μ	457	682	447	518	650	770	261	436	274	429
			σ	52	15	32	17	84	9	28	17	26	20
		NK	μ	471	667	464	580	676	772	272	477	285	481
			σ	47	8	33	8	87	39	29	9	27	12
		NP	μ	547	671	535	547	773	737	317	484	332	479
			σ	109	16	96	32	158	34	65	51	66	53
	metoda dvou tečen	GW	μ	537	660	569	575	763	705	283	533	321	530
			σ	59	8	23	9	71	5	14	9	18	10
		MT	μ	383	682	407	518	551	770	194	436	223	429
			σ	44	15	17	17	53	9	11	17	14	20
		NK	μ	469	667	500	580	677	772	238	477	274	481
			σ	50	8	21	8	65	39	13	9	17	12
		NP	μ	460	671	488	547	657	737	238	484	272	479
			σ	93	16	84	32	123	34	46	51	52	53

kde NK je výpočet podle navržených rovnic 16 – 18,
NP je výpočet podle navržených rovnic 19 – 20.

Tabulka 44 Souhrnná tabulka výsledků protlačovacích zkoušek bez použití navržených korelačních vztahů.

			P91		10Ch2MFA		20CrNi2MoV		11 416		42 2707		
			R _e	R _m	R _e	R _m	R _e	R _m	R _e	R _m	R _e	R _m	
			[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	
Tahová zkouška		μ	495	663	491	607	676	801	245	452	242	463	
		σ	2	4	1	1	1	1	2	18	0	0	
Protlačovací zkouška	smluvní metoda	GW	μ	636	660	623	575	896	705	373	533	390	530
			σ	70	8	43	9	84	5	38	9	35	10
		MT	μ	457	682	447	518	650	770	261	436	274	429
			σ	52	15	32	17	84	9	28	17	26	20
		NP	μ	547	671	535	547	773	737	317	484	332	479
			σ	109	16	96	32	158	34	65	51	66	53
	metoda dvou tečen	GW	μ	537	660	569	575	763	705	283	533	321	530
			σ	59	8	23	9	71	5	14	9	18	10
		MT	μ	383	682	407	518	551	770	194	436	223	429
			σ	44	15	17	17	53	9	11	17	14	20
		NP	μ	460	671	488	547	657	737	238	484	272	479
			σ	93	16	84	32	123	34	46	51	52	53

Oceli s nevýraznou mezí kluzu

Do skupiny ocelí s nevýraznou mezí kluzu patří oceli P91 (obr. 33), 10Ch2MFA (obr. 38) a 20CrNi2MoV (obr. 43). Pro tyto oceli je nejvhodnější pro výpočet meze kluzu a meze pevnosti ze záznamu síla – posunutí, získaného protlačovacími zkouškami na miniaturních discích, použít navržené korelační vztahy vytvořené přímo pro používaný zkušební stroj. Pro výpočet meze kluzu R_e je to v tomto případě rovnice 17, ve kterém je síla F_e určena metodou dvou tečen. Pro výpočet meze pevnosti je ideální rovnice 18.

Výpočetní vztahy nalezené v literatuře byly tedy pravděpodobně stanoveny pro jiný typ materiálu.

Oceli s výraznou mezí kluzu

Dvojici ocelí s výraznou mezí kluzu tvoří oceli 11 416 (obr. 49) a 42 2707 (obr. 54). Při výpočtu meze pevnosti těchto ocelí je nejvhodnější použít vztah pro výpočet autorů Maa a Takahashiho (rovnice 2). Pro výpočet meze kluzu je v obou případech nejvhodnější navržený korelační vztah (rovnice 17), ve kterém je síla F_e určena metodou dvou tečen.

Pokud by navržené korelační vztahy pro daný zkušební stroj nebyly k dispozici, obecně by byla pro výpočet meze kluzu nejvhodnější rovnice 19, tedy průměr hodnot vypočtených podle rovnic 1 a 3. Při výpočtu meze pevnosti by nezáleželo na tom, zda pro výpočet meze pevnosti R_m vybereme rovnici 2 (Mao, Takahashi) nebo rovnici 4 (Guan, Wang).

Žádný uvedený vztah pro výpočet však není dostatečně spolehlivý. Také Klevtsov a kol. ve své práci *Using of small punch test for determination of tensile properties for power plant steels* [29] zjistili, že z protlačovacích zkoušek nelze získat hodnoty meze kluzu R_e , meze pevnosti R_m , či dokonce síly odpovídající iniciaci plastické deformace oceli s dostatečnou přesností.

6.2 Diskuze výsledků teplotních závislostí

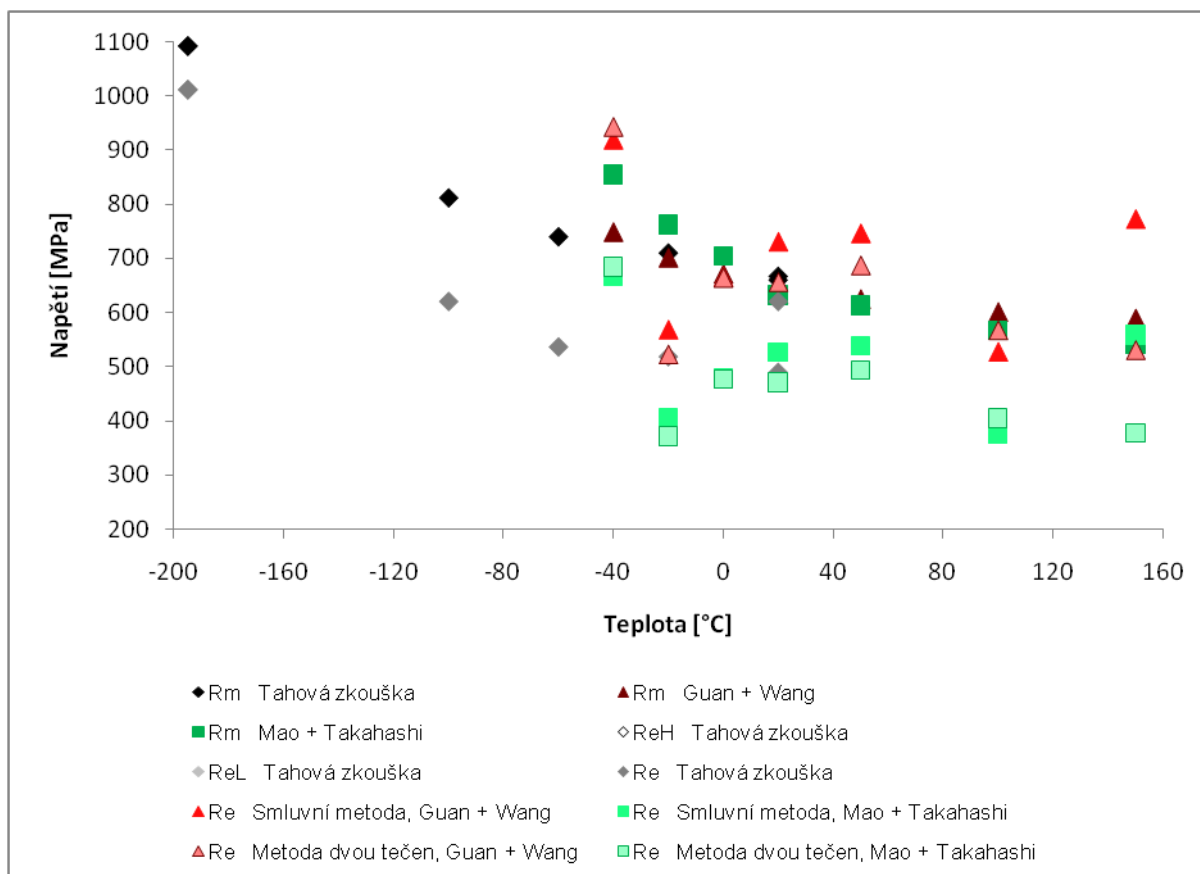
Výsledné teplotní závislosti meze kluzu R_e obou ocelí (P91 a 42 2707) nekopírují předpokládaný trend poklesu napětí s rostoucí teplotou. V rozsahu teplot od -40 °C do $+100\text{ °C}$ je u obou ocelí pokles meze pevnosti R_m s rostoucí teplotou zřejmý. V případě oceli P91 je tento trend patrný v celém teplotním rozsahu zkoušek.

Hodnoty meze kluzu a meze pevnosti získané z protlačovacích zkoušek byly porovnány s daty z tahových zkoušek. Výsledky tahových zkoušek byly převzaty z disertační práce Ing. Zdeňka Chlupa, Ph.D. [56], a proto nebylo možné ovlivnit teplotní rozsah zkoušek, které byly provedeny při teplotách od -196 °C do $+20\text{ °C}$. Při provádění protlačovacích zkoušek bylo možné dosáhnout nejnižší teploty -40 °C , při nižší teplotě docházelo k zamrznání zkušebního přípravku. Nejvyšší dosažená teplota byla $+150\text{ °C}$.

Přestože je rozsah teplot, ve kterém byly provedeny tahové i protlačovací zkoušky malý, lze grafické výsledky porovnávat alespoň v takovémto rozsahu.

6.2.1 Ocel P91

Teplotní závislost meze kluzu a meze pevnosti oceli P91 získaná z výsledků tahových zkoušek je na *obr. 62* zvýrazněna odstíny černé barvy. Tato teplotní závislost ukazuje jasný pokles napětí s rostoucí teplotou.



Obr. 62 Teplotní závislost meze kluzu a meze pevnosti oceli P91 [56]

Teplotní závislost získaná protlačovacími zkouškami (červená a zelená barva v grafu na obr. 62) se od závislosti získané tahovou zkouškou liší. Při výpočtu meze kluzu velmi záleží na volbě výpočtového vztahu. Rozdíl mezi nejnížší a nejvyšší hodnotou meze kluzu R_e z protlačovací zkoušky je 100 – 250 MPa, v závislosti na teplotě zkoušky. U meze pevnosti R_m vypočtené podle vztahu Guana a Wanga, resp. Maa a Takahashiho se křivky teplotních závislostí kříží a nejsou příliš odlišné od výsledků tahové zkoušky.

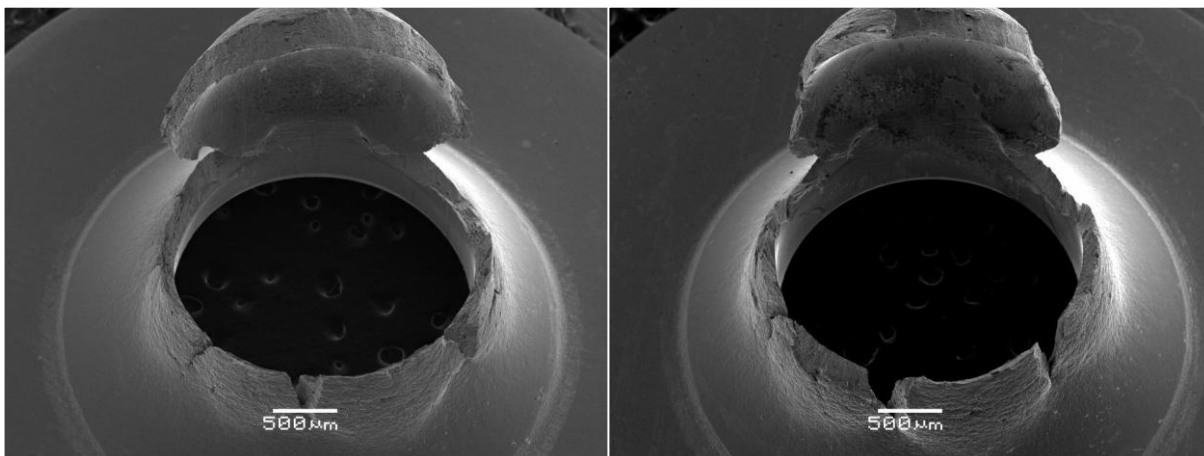
Mez pevnosti R_m získaná z protlačovacích zkoušek výpočtem podle dvojice Guan, Wang pro jednotlivé teploty je věrohodná. Naopak jednotlivé hodnoty meze pevnosti vypočtené podle vztahu autorů Maa a Takahashiho jsou nadhodnoceny a neodpovídají tahové zkoušce.

Stejně tomu je u protlačovacích zkoušek provedených na upraveném creepovém stroji (kapitola 5.1.6), kde při výpočtu meze pevnosti R_m také více odpovídaly výsledky vypočtené podle vztahu Guana a Wanga. Výsledky meze pevnosti podle Maa a Takahashiho byly nadhodnocené.

Při výpočtech meze kluzu R_e z protlačovacích zkoušek je situace opačná. Lépe odpovídají výsledky podle autorů Maa a Takahashiho a nadhodnocené jsou výsledky podle Guana a Wanga. Při pohledu na výsledky protlačovacích zkoušek provedených na upraveném creepovém stroji (kapitola 5.1.6) lze dojít k závěru, že také při těchto zkouškách byl pro určení meze kluzu R_e vhodnější vztah dle Maa a Takahashiho.

Nesoulad výsledků protlačovacích a tahových zkoušek je pravděpodobně způsoben použitím všeobecných vztahů. Pro nedostatek experimentálních dat totiž nebyly stanoveny korelační vztahy platné pro univerzální zkušební stroj INSTRON 2620-602.

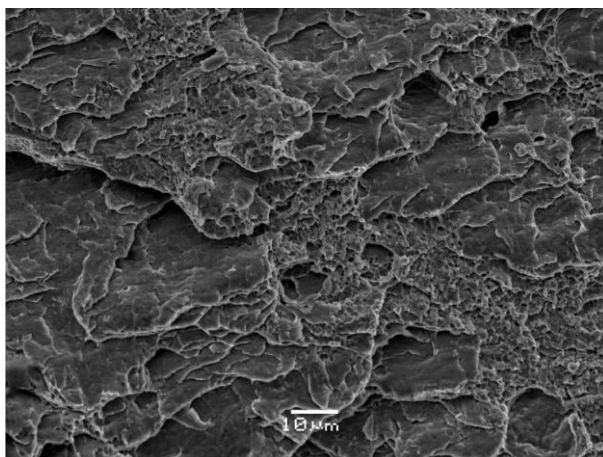
Na obr. 63 a obr. 64 jsou fotografie zkušebních vzorků oceli P91 po porušení. Vzorek po zkoušce při teplotě $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ je na obr. 63, vzorek po zkoušce při teplotě $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ je na obr. 64. Vzhled porušených vzorků je při nejvyšší i nejnížší teplotě téměř stejný. Rozdíl teplot se projevuje pouze v míře rozevření radiálních trhlin.



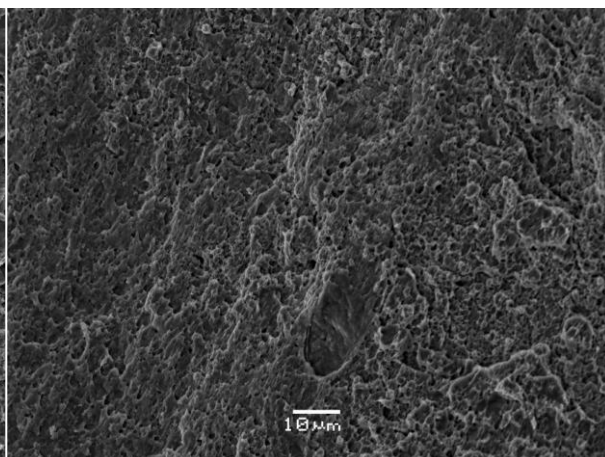
Obr. 63 Vzorek po provedení zkoušky při teplotě $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Obr. 64 Vzorek po provedení zkoušky při teplotě $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$

Při bližším pozorování lomové plochy těchto 2 vzorků (obr. 65 a 66) zjistíme, že lomová plocha vzorku zkoušeného při vyšší teplotě je tvořena drobnějšími jamkami. Oba vzorky byly porušeny tvárným lomem.



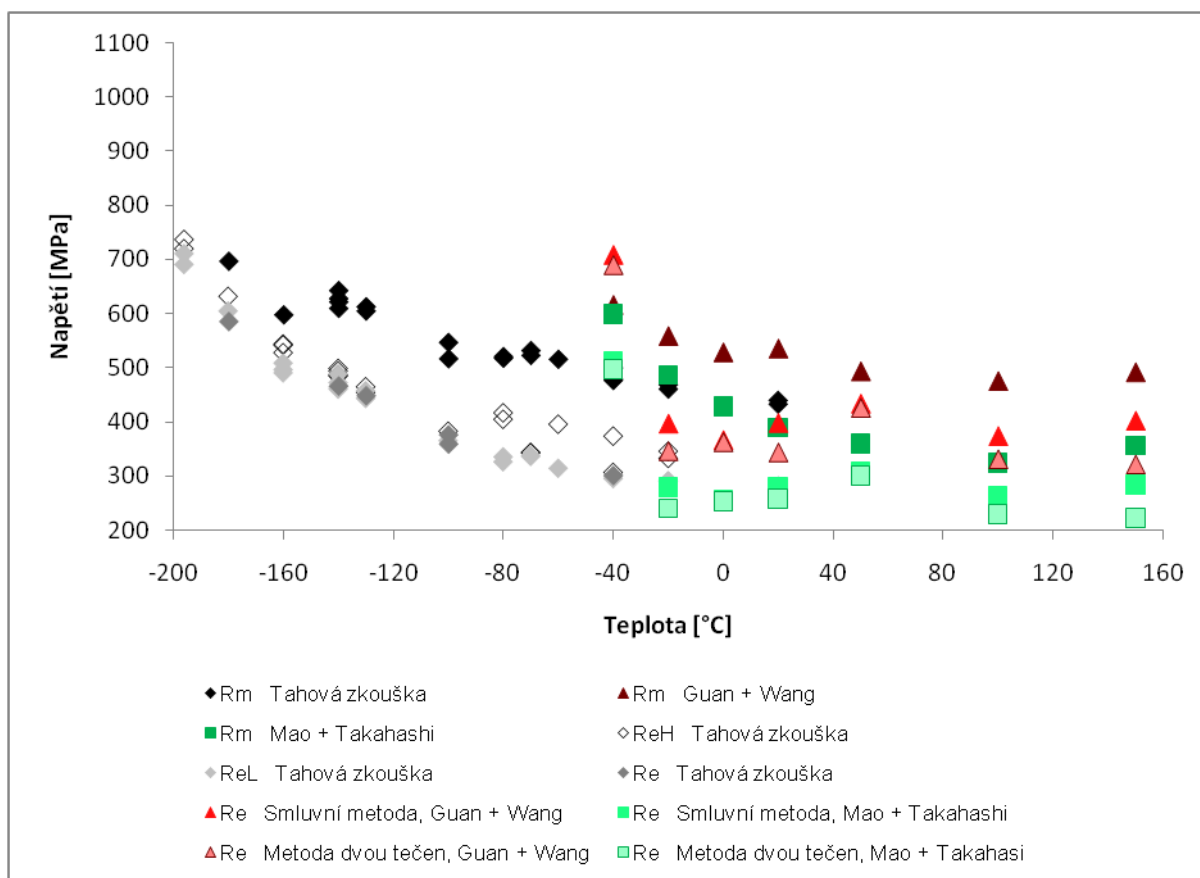
Obr. 65 Lomová plocha vzorku oceli P91 porušeného při teplotě -40 °C



Obr. 66 Lomová plocha vzorku oceli P91 porušeného při teplotě +150 °C

6.2.2 Ocel ČSN 42 2707

Teplotní závislost meze kluzu a meze pevnosti oceli ČSN 42 2707 získaná z výsledků tahových zkoušek je na obr. 67 opět zvýrazněna odstíny černé. Tato teplotní závislost ukazuje jasný pokles meze kluzu s rostoucí teplotou, pokles meze pevnosti s rostoucí teplotou již není tak patrný, ale lze jej v grafu spatřit.



Obr. 67 Teplotní závislost meze kluzu a meze pevnosti oceli 42 2707 [56]

Teplotní závislost získaná protlačovacími zkouškami (červená a zelená barva v grafu na obr. 67) je i v tomto případě výsledkům tahových zkoušek poněkud vzdálená. Rozdíl mezi hodnotami meze kluzu v závislosti na použitém výpočetním vztahu se liší o 100 – 200 MPa. Rozdíl meze pevnosti u různých vztahů je nepatrný pouze u teploty $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, poté se rozdíl zvětšuje a dosahuje až 250 MPa.

Mez pevnosti R_m získaná protlačovacími zkouškami je vyšší, než při hodnocení konvenčními tahovými zkouškami. Výsledkům tahové zkoušky se více blíží hodnoty vypočtené podle Maa a Takakashiho. Hodnoty vypočtené podle vztahu autorů Guana a Wanga jsou nadhodnocené.

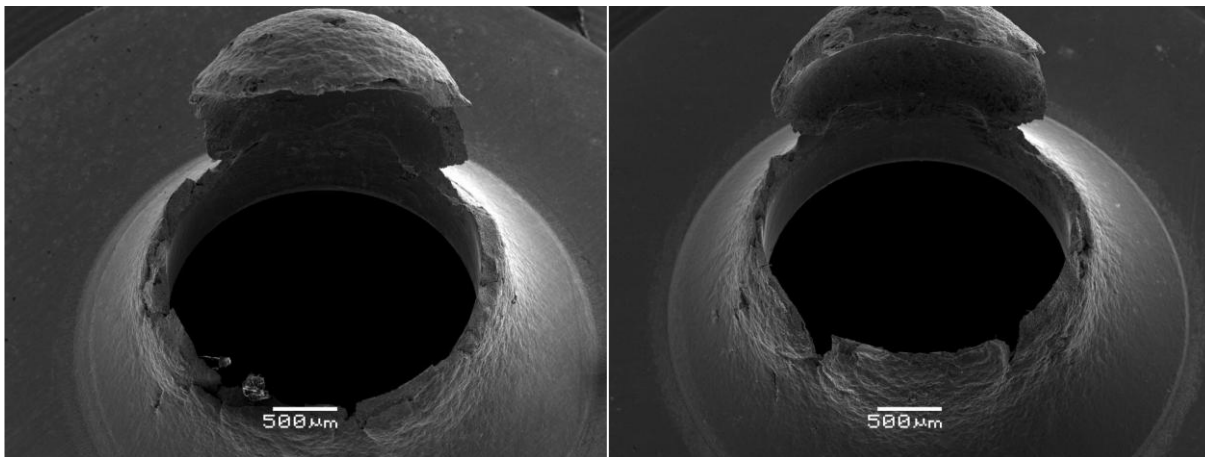
U meze kluzu R_e (s výjimkou hodnot meze kluzu stanovených při teplotě $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) lze předpokládat, že její teplotní závislost vypočítaná podle dvojice Mao, Takahashi přibližně odpovídá průběhu tahové zkoušky. Také u meze kluzu jsou výsledky podle vztahu Guana a Wanga nadhodnocené.

Porovnáním těchto výsledků s výsledky předchozími, tedy z protlačovacích zkoušek provedených za pokojové teploty, zjistíme, že pro mez kluzu R_e i mez pevnosti R_m oceli 42 2707 je výhodnější použít vztah Maa a Takahashiho, protože vztah podle Guana a Wanga výsledné hodnoty nadhodnocuje.

Pokud by byly výpočetní vztahy navrženy konkrétně pro ocel 42 2707 a univerzální zkušební stroj INSTRON 2620-602, lze předpokládat, že by se výsledky získané z tahových zkoušek a výsledky z protlačovacích zkoušek více shodovaly.

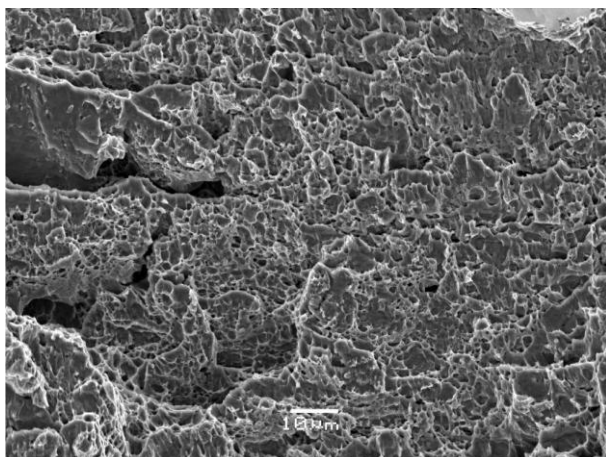
Na obr. 68 a obr. 69 jsou fotografie zkušebních vzorků oceli 42 2707 po porušení. Vzorek po zkoušce při teplotě $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ je na obr. 68, vzorek po zkoušce při teplotě $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ je na obr. 69. Vzhled porušených vzorků je při nejvyšší i nejnižší teplotě téměř stejný. Rozdíl teplot se opět projevuje pouze v míře rozevření radiálních trhlin.

Při bližším pozorování lomové plochy těchto 2 vzorků (obr. 70 a 71) zjistíme, že lom vzorku zkoušeného při nižší teplotě se šířil také kolmo k lomové ploše, ale v obou případech byl tvárný.

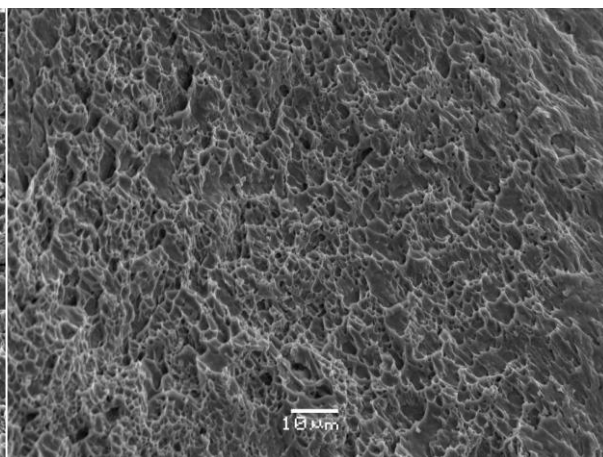


Obr. 68 Vzorek po provedení zkoušky při teplotě $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Obr. 69 Vzorek po provedení zkoušky při teplotě $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$



Obr. 70 Lomová plocha vzorku oceli
42 2707 porušeného při teplotě -40 °C



Obr. 71 Lomová plocha vzorku oceli
42 2707 porušeného při teplotě 150 °C

7 ZÁVĚR

Mikrostruktura ocelí

Byla pozorována mikrostruktura ocelí P91, 10Ch2MFA, 20CrNi2MoV, 11 416 a 42 2707, která je u jednotlivých ocelí tato:

- **ocel P91** – bainitická mikrostruktura, s karbidy chromu, průměrná velikost zrna přibližně 20 μm ,
- **ocel 10Ch2MFA** – bainitická s karbidy chromu, manganu, molybdenu a vanadu, průměrná velikost zrna přibližně 400 μm ,
- **ocel 20CrNi2MoV** – bainitická s karbidy chromu, manganu, molybdenu a vanadu, průměrná velikost zrna přibližně 50 μm ,
- **ocel 11 416** – feriticko-perlitická řádkovitě uspořádaná, průměrná velikost zrna v ploše kolmé ke směru tváření přibližně 50 μm ,
- **ocel 42 2707** – směs feritu a bainitu, průměrná velikost zrna přibližně 50 μm .

Fraktografická analýza

Pozorovaná lomová plocha všech 5 druhů ocelí (P91, 10Ch2MFA, 20CrNi2MoV, 11 416 a 42 2707) byla porušena tvárným lomem. Na lomové ploše byla patrná jamková morfologie porušování.

Zkoušky za pokojové teploty

Byly provedeny tahové zkoušky za pokojové teploty a následně protlačovací zkoušky na miniaturních discích, také za pokojové teploty. Ze záznamů tahových zkoušek lze pozorované oceli rozdělit do 2 skupin, a to na oceli s nevýraznou mezí kluzu a oceli s výraznou mezí kluzu. Mezi oceli s nevýraznou mezí kluzu patří oceli P91, 10Ch2MFA a 20CrNi2MoV. Zbylé 2 oceli, konkrétně 11 416 a 42 2707 jsou oceli s mezí kluzu výraznou.

Z tahových i protlačovacích zkoušek byly vyhodnoceny základní mechanické vlastnosti jednotlivých druhů ocelí P91, 10Ch2MFA, 20CrNi2MoV, 11 416 a 42 2707, konkrétně mez kluzu R_e , resp. $R_{p0,2}$ a mez pevnosti R_m . Výsledky obou typů zkoušek byly mezi sebou porovnány.

Pro hodnocení meze kluzu R_e , resp. $R_{p0,2}$ i meze pevnosti R_m pozorovaných ocelí z protlačovacích zkoušek na miniaturních discích byly použity 4 výpočetní vztahy získané z literatury (rovnice 1 - 4) a 5 vztahů vlastních (rovnice 16 - 20).

Při výpočtech hledaných mechanických charakteristik (meze kluzu a meze pevnosti) z protlačovacích zkoušek se v případě ocelí s nevýraznou mezí kluzu (P91, 10Ch2MFA a 20CrNi2MoV) nejvíce osvědčily vlastní navržené vztahy (rovnice 16 - 20), které byly stanoveny pro konkrétní zkušební stroj (tab. 43). V případě ocelí s výraznou mezí kluzu se pro výpočet meze kluzu také nejvíce osvědčil navržený korelační vztah (rovnice 17), pro výpočet meze pevnosti byl však vhodnější vztah autorů Mao a Takahashiho (rovnice 2)

Pokud by korelační vztahy pro konkrétní zkušební stroj nebyly k dispozici (tab. 44), pak by nezáleželo na tom, zda pro výpočet meze pevnosti R_m vybereme rovnici 2 (Mao, Takahashi) nebo rovnici 4 (Guan, Wang). Pro získání hodnot meze kluzu R_e , ocelí s výraznou i nevýraznou mezí kluzu, které by se co nejvíce blížily výsledkům konvenční tahové zkoušky, by byla nejvhodnější rovnice 19, tedy průměr hodnot vypočtených podle rovnic 1 a 3.

Teplotní závislosti

Teplotní závislosti meze kluzu R_e a meze pevnosti R_m byly stanoveny pro oceli P91 a 42 2707. Hodnoty získané protlačovacími zkouškami se u obou ocelí odlišují od teplotních závislostí z tahových zkoušek.

Při pozorování teplotní závislosti oceli P91 bylo zjištěno, že mez kluzu R_e i mez pevnosti R_m vypočtené podle autorů Maa a Takahashiho pro jednotlivé teploty jsou nadhodnocené. Výsledky meze kluzu R_e i meze pevnosti R_m podle Guana a Wanga odpovídají tahové zkoušce.

U oceli 42 2707 jsou meze kluzu R_e i meze pevnosti R_m vypočtené pro jednotlivé teploty podle autorů Maa a Takahashiho naopak odpovídající a nadhodnocená je mez kluzu i mez pevnosti R_m vypočtená podle Guana a Wanga.

Nesoulad výsledků je pravděpodobně způsoben použitím všeobecných vztahů. Pro nedostatek experimentálních dat totiž nebyly stanoveny korelační vztahy platné pro univerzální zkušební stroj INSTRON 2620-602.

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [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] *NPL report DEPC-MPE: Miniaturised Testing*. Scotland: Queen's Printer, 2007. ISSN 1744-0262. Dostupné z: http://www.npl.co.uk/upload/pdf/depc_mpe42.pdf
- [3] 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, roč. 75, č. 9, s. 699-706 [cit. 2013-04-05]. ISSN 03080161. DOI: 10.1016/S0308-0161(98)00074-X. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030801619800074X>
- [4] KANDER, Ladislav, Miroslav FILIP, Karel MATOCHA a Jaroslav PURMENSÝ. Hodnocení materiálových vlastností kotlového tělesa po dlouhodobém provozu metodou malých vzorků. In: *Metal 2013* [online]. 2013 [cit. 2013-04-05]. Dostupné z: http://www.metal2013.com/files/proceedings/metal_06/papers/206.pdf
- [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. 2013-03-31]. Dostupné z: <http://www.icf11.com/proceeding/EXTENDED/4175.pdf>
- [6] LUCAS, G. E. Review of small specimen test techniques for irradiation testing. *Metallurgical Transactions A*. 1990, roč. 21, č. 5, s. 1105-1119. ISSN 0360-2133. DOI: 10.1007/BF02698242. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/BF02698242>
- [7] SSam2™ Surface Sampling Systems. EXPONENT. *Exponent: Engineering and Scientific Consulting* [online]. 2010 [cit. 2013-03-23]. Dostupné z: <http://www.exponent.com/ssam/>
- [8] HRIVŇÁK, Ivan. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. 1. vyd. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2009, 486 s. ISBN 978-80-227-3167-6.
- [9] CWA 15627. Small Punch Test Method for Metallic Materials: CEN Workshop Agreement. Brusel: CEN, 2007, 70 s.
- [10] RODRÍGUEZ, C., E. CÁRDENAS, F. J. BELZUNCE a C. BETEGÓN. Fracture Characterization of Steels by Means of the Small Punch Test. *Experimental Mechanics* [online]. 2013, roč. 53, č. 3, s. 385-392 [cit. 2013-03-18]. ISSN 0014-4851. DOI: 10.1007/s11340-012-9637-x. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11340-012-9637-x>
- [11] KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (Nauka o materiálu IV)*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008, 571 s. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [12] DYMÁČEK, Petr, Marek JEČMÍNKA a Martin ABENDROTH. Prediction of Static Material Properties of P92 Steel Based on Small Punch Test. In: *New Methods of Damage and Failure Analysis of Structural Parts*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2012, s. 279-286. ISBN 978-80-248-2802-2.

- [13] MCNANEY, J., G.E. LUCAS a G.R. ODETTE. Application of ball punch tests to evaluating fracture mode transition in ferritic steels. *Journal of Nuclear Materials* [online]. 1991, 179-181, s. 429-433 [cit. 2013-03-31]. ISSN 00223115. DOI: 10.1016/0022-3115(91)90116-O. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/002231159190116O>
- [14] FOULDS, J. R., et al. Miniature sample removal and small punch testing for in-service component FATT. In: *Clean Steels Technology: Proceedings of the R. I. Jaffee Memorial Symposium*. 1992. p. 101-109.
- [15] ABENDROTH, M. a M. KUNA. Determination of Ductile Material Properties by Means of the Small Punch Test and Neural Networks. *Advanced Engineering Materials* [online]. 2004, roč. 6, č. 7, s. 536-540 [cit. 2013-04-02]. ISSN 1438-1656. DOI: 10.1002/adem.200400405. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/adem.200400405>
- [16] ULE, B., T. ŠUŠTAR, F. DOBEŠ, K. MILIČKA, V. BICEGO, S. TETTAMANTI, K. MAILE, C. SCHWARZKOPF, M. P. WHELAN, R. H. KOZLOWSKI a J. KLAPUT. Small punch test method assessment for the determination of the residual creep life of service exposed components: outcomes from an interlaboratory exercise. *Nuclear engineering and design* [online]. Amsterdam: North-Holland Publ, 1999, č. 192, s. 1-11 [cit. 2013-03-24]. ISSN 0029-5493. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549399000394>
- [17] SpringerImages: Schematic of the small-punch test jig. *SpringerImages* [online]. 2013 [cit. 2013-03-24]. Dostupné z: http://www.springerimages.com/Images/RSS/1-10.1007_s11661-008-9492-7-1
- [18] LUCAS, G.E. The development of small specimen mechanical test techniques. *Journal of Nuclear Materials*. 1983, č. 117, s. 327-339. ISSN 00223115. DOI: 10.1016/0022-3115(83)90041-7. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0022311583900417>
- [19] DYMÁČEK, Petr, Karel MILIČKA a Vojtěch HRUBÝ. Fracture evolution in small punch tests under constant deflection rate conditions. In: *17th European Conference on Fracture*. Brno, 2008, s. 387-393.
- [20] MERCALDI, David W. FAILURE ANALYSIS ASSOCIATES. *Surface sampling device* [patent]. USA. US Patent, 4845896. Uděleno 1. červenec 1989. Zapsáno 24. únor 1987. Dostupné z: <http://www.google.cz/patents?hl=cs&lr=&vid=USPAT4845896&id=SLE2AAAAEBAJ&oi=fnd&dq=Failure+analysis+associates&printsec=abstract#v=onepage&q&f=false>
- [21] PURMENSKÝ, Jaroslav a Karel MATOCHA. Zkoušení pomocí malých vzorků ve fyzikální metalurgii. In: *Metal 2013* [online]. 2013 [cit. 2013-04-19]. Dostupné z: http://www.metal2013.com/files/proceedings/metal_01/papers/70.pdf
- [22] Hodnocení aktuálních křehkolomových vlastností energetických zařízení pomocí penetračních testů. *Koroze a ochrana materiálu* [online]. 2007, roč. 51, č. 3, s. 59-63 [cit. 2013-03-24]. ISSN 0452-599x. Dostupné z: <http://www.casopis-koroze.cz/index.php>
- [23] Laboratoř únavových a křehkolomových vlastností. *Materiálový a metalurgický výzkum* [online]. 2010 [cit. 2013-03-24]. Dostupné z: <http://www.mmvyzkum.cz/943/cz/lab2.html>

- [24] MAO, X., H. TAKAHASHI a T. KODAIRA. Supersmall punch test to estimate fracture toughness J_{IC} and its application to radiation embrittlement of 2.25Cr-1Mo steel. *Materials Science and Engineering: A*. 1992, roč. 150, č. 2, s. 231-236. ISSN 09215093. DOI: 10.1016/0921-5093(92)90116-I. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/092150939290116I>
- [25] BARABÁŠ, Martin. *Elektrojiskrové řezání drátovou elektrodou*. Brno, 2012. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=50781. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Vendula Švecová.
- [26] MA, Young Wha, 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]. Lausanne: Elsevier Sequoia, 2010, roč. 527, 16-17, s. 3630-3638 [cit. 2013-04-12]. ISSN 09215093. DOI: 10.1016/j.msea.2010.02.057. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509310002236>
- [27] MATOCHA, Karel, Miroslav FILIP a Šárka STEJSKALOVÁ. *Determination of critical temperature of brittleness T_{KO} by small punch tests* [online]. 2012 [cit. 2013-3-24]. Dostupné z: <http://www.comat.cz/files/proceedings/11/reports/1126.pdf>
- [28] LINSE, T., M. KUNA, J. SCHUHKNECHT a H.-W. VIEHRIG. Usage of the small-punch-test for the characterisation of reactor vessel steels in the brittle-ductile transition region. *Engineering Fracture Mechanics* [online]. 2008, roč. 75, č. 11, s. 3520-3533 [cit. 2013-03-26]. ISSN 00137944. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2007.03.047. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013794407002160>
- [29] 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>
- [30] ABENDROTH, Martin a Meinhard KUNA. Identification of ductile damage and fracture parameters from the small punch test using neural networks. *Engineering Fracture Mechanics* [online]. 2005, roč. 73, č. 6, s. 710-725 [cit. 2013-04-26]. ISSN 00137944. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2005.10.007. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013794405002705>
- [31] DYMAČEK, Petr. Short Term Creep Small Punch Testing of P91 and P92 Steels, Observations and Correlations with the Numerical Results. *Key Engineering Materials* [online]. 2011, č. 465, s. 179-182 [cit. 2013-04-16]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.465.179. Dostupné z: <http://www.scientific.net/KEM.465.179>
- [32] PENG, Du. Assessment of Mechanical Properties of SUS304 by Mean of Small Punch Test at Elevated Temperatures. In: *Materiálový a metalurgický výzkum* [online]. 2010 [cit. 2013-04-06]. Dostupné z: http://www.mmvyzkum.cz/Obr/34_Assessment%20of%20Mechanical.....pdf
- [33] GUAN, Kaishu a Zhiwen WANG. SPT code of tensile test. In: *Materiálový a metalurgický výzkum* [online]. 2010 [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: http://www.mmvyzkum.cz/Obr/10_Development%20of%20Small.....pdf

- [34] MAO, Xinyuan a Hideaki TAKAHASHI. Development of a further-miniaturized specimen of 3 mm diameter for TEM disk ($\varnothing$ 3 mm) small punch tests. *Journal of Nuclear Materials* [online]. 1987, roč. 150, č. 1, s. 42-52 [cit. 2013-04-05]. ISSN 00223115. DOI: 10.1016/0022-3115(87)90092-4. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0022311587900924>
- [35] ČSN EN 10 045-1. *Kovové materiály - Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho – Část 1: Zkušební metoda (V a U vruby)*. Praha: Český normalizační institut, 1997.
- [36] MOLLIKOVÁ, E., P. KALÁB, L. STRÁNSKÝ a J. SEDLÁČEK. Zkouška rázem v ohybu: Studijní opora. In: *Ústav materiálových věd a inženýrství* [online]. 2012 [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: <http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/umvi/zk.raz.ohybu.pdf>
- [37] 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 Piping* [online]. 1998, roč. 75, č. 11, s. 791-804 [cit. 2013-04-18]. ISSN 03080161. DOI: 10.1016/S0308-0161(98)00077-5. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0308016198000775>
- [38] 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, vol. 150, issue 2, s. 194-202 [cit. 2013-05-24]. DOI: 10.1016/0022-3115(87)90075-4. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0022311587900754>
- [39] BULLOCH, J.H. A review of the ESB small punch test data on various plant components with special emphasis on fractographic details. *Engineering Failure Analysis* [online]. 2002, roč. 9, č. 5, s. 511-534 [cit. 2013-04-26]. ISSN 13506307. DOI: 10.1016/S1350-6307(01)00034-6. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1350630701000346>
- [40] BULLOCH, J.H. A study concerning material fracture toughness and some small punch test data for low alloy steels. *Engineering Failure Analysis* [online]. 2004, vol. 11, issue 4, s. 635-653 [cit. 2013-04-04]. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2003.05.020. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1350630703001080>
- [41] 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, roč. 75, č. 9, s. 707-713 [cit. 2013-03-25]. ISSN 03080161. DOI: 10.1016/S0308-0161(98)00075-1. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0308016198000751>
- [42] MAO, X., H. TAKAHASHI a T. KODAIRA. Estimation of mechanical properties of irradiated nuclear pressure vessel steel by use of subsized CT specimen and small punch specimen. *Scripta Metallurgica et Materialia* [online]. 1991, vol. 25, issue 11, s. 2487-2490 [cit. 2013-05-24]. DOI: 10.1016/0956-716X(91)90054-5. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0956716X91900545>
- [43] FINARELLI, D., M. ROEDIG a F. CARSUGHI. Small punch tests on austenitic and martensitic steels irradiated in a spallation environment with 530 MeV protons. *Journal of Nuclear Materials* [online]. 2004, roč. 328, 2-3, s. 146-150 [cit. 2013-04-05]. ISSN 00223115. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2004.04.320. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022311504004568>

- [44] CÁRDENAS, E., F. J. BELZUNCE, C. RODRÍGUEZ, I. PEÑUELAS a C. BETEGÓN. Application of the small punch test to determine the fracture toughness of metallic materials. *Fatigue* [online]. 2011, roč. 35, č. 5, s. 441-450 [cit. 2013-03-23]. ISSN 8756758x. DOI: 10.1111/j.1460-2695.2011.01635.x. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1460-2695.2011.01635.x>
- [45] CUESTA, I.I. a J.M. ALEGRE. Determination of the fracture toughness by applying a structural integrity approach to pre-cracked Small Punch Test specimens. *Engineering Fracture Mechanics* [online]. 2011, roč. 78, č. 2, s. 289-300 [cit. 2013-04-26]. ISSN 00137944. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2010.09.004. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013794410003978>
- [46] JU, Jang-Bog, Jae-il JANG a Dongil KWON. Evaluation of fracture toughness by small-punch testing techniques using sharp notched specimens. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* [online]. 2003, roč. 80, č. 4, s. 221-228 [cit. 2013-04-26]. ISSN 03080161. DOI: 10.1016/S0308-0161(03)00042-5. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0308016103000425>
- [47] YANG, Zhen a Zhi-wen WANG. Relationship between strain and central deflection in small punch creep specimens. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* [online]. 2003, vol. 80, issue 6, s. 397-404 [cit. 2013-04-23]. DOI: 10.1016/S0308-0161(03)00069-3. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0308016103000693>
- [48] 1.4903. *Cr-Mo-V-Nb ocel*. Praha: Český normalizační institut, 1994.
- [49] KLAČURKOVÁ, L. a K. SLÁMEČKA, L. ČELKO, O. MAN, Atlas materiálových struktur –(AMS) [CD-ROM]. 2009, Vysoké učení technické v Brně, Brno. [cit. 2012-03-02]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/index.php/cs/studium/ke-stazeni>
- [50] ČSN 41 7116. *Ocel 17 116 Cr-Mo*. Praha: Český normalizační institut, 1980.
- [51] MAZANEC, Karel. *Základní fyzikálně-metalurgické charakteristiky materiálů pro jadernou energetiku*. 1. vyd. Ostava: VŠB, 1979.
- [52] SHEN, Hong-wei, Si-yu WANG a Xia LIU. Development and Performance Test for New Welding Rotor Material 25Cr2Ni2MoV. *Thermal Turbine* [online]. 2008, roč. 3, č. 37 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://wenku.baidu.com/view/a3d5f1d033d4b14e8524685a.html>
- [53] ČSN 41 1416. *Nízkouhliková ocel obvyklých jakostí pro vyšší teploty*. Praha: Český normalizační institut, 1978.
- [54] ČSN 42 2707. *Ocel na odlitky 42 2707 manganová*. Praha: Český normalizační institut, 1991.
- [55] DLOUHÝ, Ivo. *Transferability of fracture mechanical characteristics: proceedings of the NATO Final Project Workshop on Fracture Resistance of Steels for Containers of Spent Nuclear Fuel arranged within Science for Peace Program, held in Brno, Czech Republic, from 5 to 6 November 2001*. Dordrecht: Kluwer Academic, 2002. ISBN 1-4020-0795-7.
- [56] CHLUP, Zdeněk. *Mikromechanistické aspekty iniciace křehkého lomu*. Brno: VUT FSI, 2001. 169 s. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ivo Dlouhý.

9 SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

Fyzikální veličiny

veličina	jednotka	význam
F_e	[N]	síla charakterizující přechod z lineární části grafu závislosti síla-posunutí do té části grafu, ve které se ve vzorku rozvíjí zplastizovaná oblast
F_m	[N]	maximální síla zaznamenaná během protlačovací zkoušky
u_m	[mm]	posunutí odpovídající maximální síle F_m
u_f	[mm]	posunutí razníku v okamžiku porušení tělesa; smluvně odpovídá 80% F_m
E^{SP}	[J]	lomová energie; odpovídá ploše pod křivkou síla - posunutí od počátku zkoušky do porušení vzorku
ε_f	[-]	efektivní lomová deformace; je závislá na počáteční tloušťce vzorku h_0 a minimální tloušťce porušeného vzorku h_f
T_{SP}	[K]	tranzitní teplota protlačovací zkoušky
R_e	[MPa]	výrazná mez kluzu
$R_{p0,2}$	[MPa]	smluvní mez kluzu
R_m	[MPa]	mez pevnosti
A	[-]	tažnost
FATT	[K]	<i>Fracture Appearance Transition Temperature</i> - tranzitní teplota odpovídající 50 % křehkého lomu
J_{IC}	[N/mm]	kritická hodnota J-integrálu; charakterizuje lomovou houževnatost v oblasti elasto-plastické lomové mechaniky
K_{IC}	[MPa·m ^{-1/2}]	kritická hodnota faktoru intenzity napětí – lomová houževnatost ve stavu rovinné deformace
t_{27J}	[°C]	teplota odpovídající nárazové práci KV = 27 J
t_{41J}	[°C]	teplota odpovídající nárazové práci KV = 41 J
t_{50J}	[°C]	teplota odpovídající nárazové práci KV = 50 J
$t_{50\%}$	[°C]	teplota, při které je 50 % tvárného lomu na lomové ploše zkušebního tělesa
σ_f^{SP}	[MPa]	napětí v okamžiku porušení vzorku při u protlačovací zkoušky
K	[J]	nárazová práce (lomová energie)
KV	[J]	nárazová práce (lomová energie) vyhodnocená ze vzorku s V vrubem
σ_f	[MPa]	lomové napětí
R_{TP}	[MPa]	mez pevnosti při tečení
R_T	[MPa]	mez tečení
R_R	[MPa]	výchozí napětí
R_{RZ}	[MPa]	zbytkové napětí
θ_0	[-]	poloviční úhel kontaktu razníku s deformovaným vzorkem (viz obr. 24)
K	[-]	koeficient závislý na typu penetračního testu
χ	[-]	koeficient tření
h	[mm]	tloušťka vzorku v místě kontaktu s razníkem resp. kuličkou
n	[-]	počet vzorků
Z	[%]	zúžení celkové
σ_m	[MPa]	skutečné napětí na mezi pevnosti
ε_{pn}	[%]	skutečná deformace na mezi pevnosti
ε_u	[%]	lomová deformace

Další zkratky a symboly

SPT	Small Punch Test – protlačovací zkoušky na miniaturních vzorcích
MIT	Massachusetts Institute of Technology – Massachusettský technický institut
JAERI	Japanese Atomic Energy Research Institute – Japonský výzkumný ústav pro jadernou energii
EPRI	Electric Power Research Institute – Výzkumný institut elektrické energie
FAA	Failure Analysis Associates – Asociace analýzy lomů (dnes Exponent)
CEN	European Committee for Standardization – Evropská komise pro standardizaci
CDR	constant deflection rate – konstantní rychlost posuvu
CF	constant force – konstantní zatížení
TEM	transmisní elektronová mikroskopie
MKP	metoda konečných prvků
fy	firmy
BCC	body centered cubic – kubická tělesově centrovaná
FCC	face centered cubic – kubická plošně centrovaná
ECAP	equal channel angular pressing – bezkontrakční protlačování
μ	střední hodnota
σ	směrodatná odchylka
GW	výpočetní metoda podle Guana a Wanga (vztah 3)
MT	výpočetní metoda podle Maa a Takahashiho (vztah 1)
SM	smluvní metoda – k výpočtu je použita síla F_e určená smluvní metodou
DT	metoda dvou tečen – k výpočtu je použita síla F_e určená metodou dvou tečen
NK	výpočet podle navržených <i>vztahů 16 – 18</i>
NP	výpočet podle navržených <i>vztahů 19 – 20</i>