

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálového inženýrství

Ing. Zdeněk Chlup

MIKROMECHANISTICKÉ ASPEKTY

INICIACE KŘEHKÉHO LOMU

MICROMECHANICAL ASPECTS OF BRITTLE

FRACTURE INITIATION

ZKRÁCENÁ VERZE PHD THESIS

Obor: Fyzikální a materiálové inženýrství

Školitel: Ing. Ivo Dlouhý, CSc. (ÚFM AVČR Brno)

Konzultant: Doc. RNDr. Bohumil Vlach, CSc. (VUT Brno)

Oponenti: Doc. Ing. Miloš Vlk, CSc.
Prof. RNDr. Knésl Zdeněk, CSc.
Prof. Ing. Bohumír Strnadel, DrSc.

Datum obhajoby: 31. 10. 2001

KLÍČOVÁ SLOVA

křehký lom, iniciace křehkého porušení, constraint, dvouparametrová lomová mechanika, lomová houževnatost, duplexní ocel, ocel na odlitky.

KEY WORDS

brittle fracture, brittle fracture initiation, constraint, two parameter fracture mechanics, fracture toughness, duplex stainless steel, cast iron.

Disertační práce je uložena na odd. vědy a výzkumu Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně, Technická 2, 616 69 Brno.

© 2001 Zdeněk Chlup

ISBN 80-214-2019-7

ISSN 1213-4198

OBSAH

1 ÚVOD	5
2 SOUČASNÝ STAV ZNALOSTÍ	5
3 CÍLE PRÁCE	7
4 EXPERIMENT A POUŽITÉ METODIKY	7
4.1 Použitý materiál	7
4.1.1 Duplexní ocel	7
4.1.2 C-Mn ocel na odlitky	8
4.2 Experimentální metodiky a způsoby zpracování	8
4.2.1 Zkouška lomové houževnatosti	8
4.2.2 Zkouška tahem	9
4.2.3 Zkouška rázem v ohybu	9
4.2.4 Zkouška rázem v ohybu z malé výšky	9
4.2.5 Statická zkouška v ohybu zkušebních tyčí Charpy	10
4.2.6 Zkouška lomové houževnatosti malých těles	10
4.2.7 Fraktografie a metalografie	10
4.3 Zpracování dat z měření	10
5 VÝSLEDKY A DISKUSE	11
5.1 Lomové chování duplexní oceli	11
5.1.1 Mikromechanismus lomu	11
5.1.2 Ekvivalence účinků zkrěhnutí	11
5.1.3 Lomová houževnatost	12
5.2 Lomové chování C-Mn oceli na odlitky	13
5.2.1 Mikromechanismus lomu	13
5.2.2 Zátěžná křivka	14
5.2.3 Odolnost proti porušení u CVN těles	14
5.2.4 Lomová houževnatost	15
5.2.5 Vliv rychlosti zatěžování na lomové chování	17
5.3 Vliv délky trhliny na lomové chování	18
5.3.1 Duplexní ocel	19
5.3.2 C-Mn ocel na odlitky	20
5.4 Účinky constraint	21
5.4.1 Stanovení Q -parametru z T -napětí	21
5.4.2 Výpočet Q -parametru	23
5.4.3 Predikce J - Q závislosti	27
6 ZÁVĚRY	29
7. LITERATURA	32

1 ÚVOD

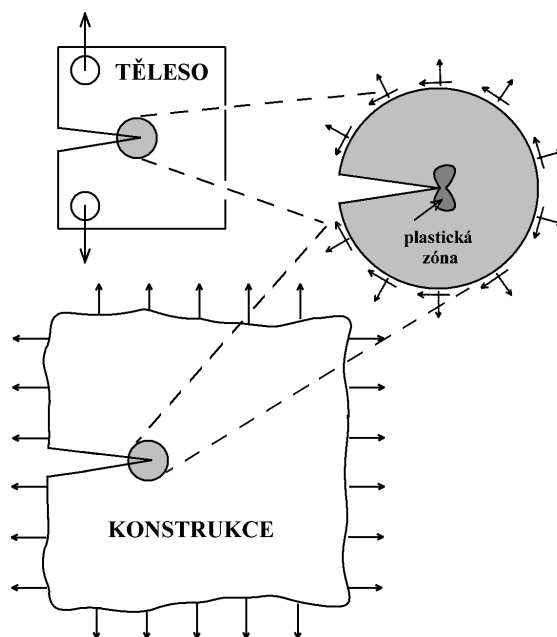
Tato práce je zaměřena na experimentální výzkum lomového chování těles s trhlinou, u nichž při zatěžování vzniká u čela trhliny plastická zóna větších rozměrů (stav velkých plastických deformací „Large Scale Yielding - *LSY*“). Tento výzkum má značný význam zejména při posuzování lomového chování těles s krátkými trhlinami. Práce se orientuje na globální přístupy predikce vlivu ztráty „constraint“ na lomovou houževnatost v tělesech s mělkou trhlinou. Při řešení bylo použito dvouparametrové lomové mechaniky. Hlavními směry v dvouparametrové lomové mechanice jsou koncepce *T*-napětí pro lineární elastickou lomovou mechaniku (*LELM*) a *Q*-parametru pro elasticko plastickou lomovou mechaniku (*EPLM*). Obě uvedené koncepce využívají k predikci vlivu „constraint“ na lomové chování mechaniku kontinua.

2 SOUČASNÝ STAV ZNALOSTÍ

Klasická lineární elastická lomová mechanika vychází z platnosti předpokladu, že již první člen Williamsova rozvoje nekonečné mocninné řady [Williams 57, Irwin 57] dostatečně popisuje stav napjatosti v okolí čela trhliny. Z důvodu použití pouze prvního členu rozvoje (jednoho parametru) se klasická lomová mechanika označuje jako jedno-parametrová. Parametrem hodnotícím stav napjatosti na čele trhliny může být faktor intenzity napětí *K* pro případ platnosti *LELM* a pro případ platnosti *EPLM* křivkový integrál *J* [Rice 68, Eshelby 68, Begley 72] nejvíce používaný ve Spojených státech, nebo otevření na čele trhliny (Crack Tip Opening Displacement) *CTOD* [Wells 63] používané v Británii. Kritické hodnoty *K*, *J* a *CTOD*, které popisují kritické podmínky na čele trhliny, při kterých nastává lom, se v jedno-parametrovém pojetí lomové mechaniky předpokládají jako materiálové charakteristiky kvantifikující odolnost proti křehkému porušení. Pokud je tento předpoklad ověřen, což za splnění jistých podmínek může nastat, pak se hodnoty parametrů charakterizujících lomové chování, získané na laboratorních zkušebních tělesech, dají použít k předpovědi lomového chování reálných konstrukcích, jak schematicky ukazuje obr. 1 [Anderson 95].

Mnoho experimentálních prací [O'Dowd 94, Shih 92] však ukazuje na úskalí při použití jedno-parametrové lomové mechaniky pro predikci lomového chování reálných konstrukcí. Klasická lineární elastická lomová mechanika nebere v úvahu ztrátu trojosé napjatosti (triaxiality) na čele trhliny, která vzniká například při zatěžování konstrukcí z materiálů malé a střední pevnosti, obsahujících krátké

trhliny (krátkými trhlinami se rozumí trhliny mající menší poměr své délky vzhledem k šířce celého průřezu než je tomu u standardní délky trhliny, tj. $a/W < 0.5$) ve stavu velkých plastických deformací.



Obr. 1 Schéma přenosu laboratorních dat na reálnou konstrukci

Tato ztráta „constraint“ je diskutovaným jevem při křehkém porušování feritických ocelí v oblasti dolní prahové úrovně hodnot lomové houževnatosti a v tranzitní oblasti [Landes 94]. Interakce mezi plastickou deformací na čele krátké trhliny a koncentrací napětí vede k dramatické relaxaci napětí v blízkosti čela trhliny. Ke zvýšení napětí na úroveň potřebnou k případnému lomu, je nezbytná vysoká hodnota vnějšího zatížení charakterizovaného hodnotou **J**-integrálu, nebo **CTOD**. Díky tomu se významně zvýší naměřená hodnota lomové houževnatosti pro tělesa s mělkou trhlinou. Tento zdánlivě pozitivní vliv nebyl doposud ve většině případů brán v úvahu při laboratorních zkouškách, ani při navrhování reálných konstrukcí. Mnoho úsilí je v současné době věnováno na vývoj různých přístupů k vysvětlení „constraint“ efektu [Shih 93, Wallin 93, Wiesner 97]. Všechny tyto metodiky mohou být rozděleny do dvou hlavních směrů: přístupy s využitím mechaniky kontinua, tzv. globální přístupy a přístupy s využitím lokálních „mikromechanistických“ parametrů porušení. Globální přístupy představují rozšíření jednoparametrové lineárně elastické i elasticko plastické lomové mechaniky o parametr, popisující triaxialitu na čele trhliny. Lokální přístupy usilují o predikci vlivu „constraint“ na čele trhliny na lomovou houževnatost pomocí napěťové

analýzy pro danou geometrii defektu a tělesa, s použitím lokálního kritéria porušení. Oba směry hrají významnou úlohu. Globální přístup poskytuje základ pro kvantifikování „constraint“, zatímco lokální přístup dává do souvislosti „constraint“ s konkrétním lomovým chováním.

3 CÍLE PRÁCE

Práce je orientována na problematiku hodnocení lomového chování ocelí v oblasti dolní prahové úrovně a v tranzitní oblasti přiléhající k dolní prahové úrovni. S ohledem na provedený rozbor současného stavu znalostí mohou být stanoveny tyto hlavní cíle práce:

- hodnocení vlivu “constraint” na lomové chování
- ověření použitelnosti stávajících přístupů k predikci J-Q závislosti
- ověření možnosti predikce tranzitního lomového chování u součástí z reálných materiálů
- zvládnutí metodiky zkoušení i modelování materiálů se specifickými vlastnostmi

4 EXPERIMENT A POUŽITÉ METODIKY

4.1 Použitý materiál

Pro experimenty byly použity dva typy materiálů. Duplexní nerezavějící ocel SAF 2205 vhodná pro ropná těžební zařízení, pro tzv. "offshore" průmysl, která pracují v extrémních podmínkách, jak z hlediska agresivity prostředí, tak i z hlediska teplot a v neposlední řadě i míry bezpečnosti na ně kladené. Druhý vyšetřovaný materiál je nízkouhlíková feriticko-perlitická manganová ocel na odlitky ČSN 42 2707, jejíž použití je plánováno jako materiál skříně úložného a transportního kontejneru na vyhořelé jaderné palivo.

4.1.1 Duplexní ocel

Použitá nerezavějící duplexní (duplex stainless steel – *DSS*) ocel SAF 2205 pochází z komerční produkce firmy Sandvik a byla dodána v podobě válcových tyčí o průměru 70 mm válcovaných za tepla. Po zjištění základních materiálových charakteristik byla u dodané oceli připravena speciálně vystárnutá struktura žiháním

za teploty 475°C po dobu 10 hodin, které, jak je popsáno v literatuře [Dlouhý 96B], má ekvivalentní účinky jako snížení teploty.

Zkušební tělesa

Zkušební tělesa SENB byla vyrobena z tyčových polotovarů o průměru 70 mm a délky 1000 mm. Část těles bylo zkoušeno ve stavu bez aplikace tepelného zpracování (v dodaném stavu) a to pro ověření vlivu zkřehávacího žíhání pro přípravu modelově vystárnuté struktury.

4.1.2 C-Mn ocel na odlitky

Pro experimentální sledování vlivu různého „constraint“ na lomové chování byla použita také nízkouhlíková feriticko-perlitická manganová ocel na odlitky ČSN 42 2707. Tato ocel byla zkoumána dvoufázově, nejprve byla odlita zkušební tavba v podobě bloků a následně také ve tvaru tlustostěnné desky, jako segment skutečné velikosti úložného a transportního kontejneru na vyhořelé jaderné palivo ve Škodě Plzeň Jaderné strojírenství.

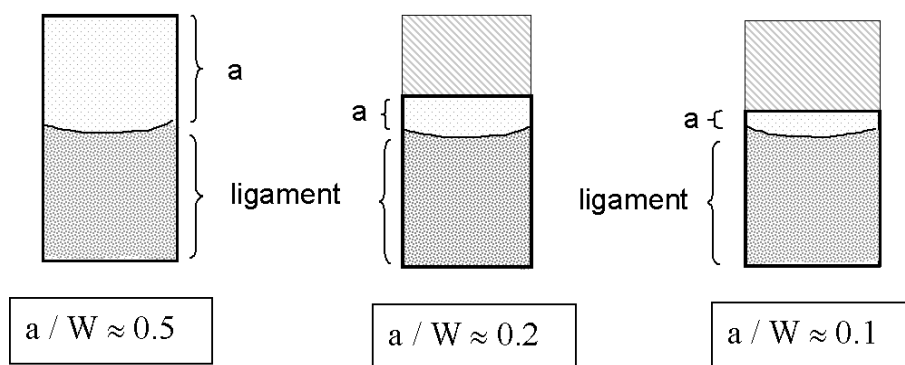
Zkušební tělesa

Po zkušenostech získaných na duplexní oceli bylo rozhodnuto rozšířit počet vyšetřovaných geometrií. Pro větší možnost uplatnění statistické analýzy dat byl experiment pro určení hodnot lomové houževnatosti na tělesech pro tříbodový ohyb navržen v dostatečném množství a to pro každou zkoumanou délku trhliny tzn. pro jednu vybranou teplotu v oblasti křehkého porušení byly provedeny zkoušky na souboru 25 těles. Ze zlomených ohybových těles byla, po odřezání lomových ploch, vyrobena zkušební tělesa pro zkoušku tahem a zkoušku rázem v ohybu. Podobný postup byl zvolen i u těles získaných z segmentu kontejneru (tavba II).

4.2 Experimentální metodiky a způsoby zpracování

4.2.1 Zkouška lomové houževnatosti

Pro určení hodnot lomové houževnatosti byly použity tři typy geometrie zkušebních těles pro zatěžování tříbodovým ohybem. Obě tělesa s mělkou trhlinou mají stejnou plochu nosného průřezu (ligamentu) pod čelem trhliny jako je tomu u standardního tělesa, jak ukazuje obr. 2. Všechny typy těles byly zkoušeny za statických podmínek zatěžování při rychlosti příčnicku 1 mm.min⁻¹ a v teplotním rozmezí od -196°C do +20°C.



Obr. 2 Schéma geometrie těles s různou délkou trhliny

Ke zkoušce byl použit univerzální mechanický zkušební stroj Zwick o maximální síle 200kN. Pro chlazení těles bylo použito par kapalného dusíku. Byla snímána závislost síla–přemístění síly.

4.2.2 Zkouška tahem

Pevnostní a deformační charakteristiky byly měřeny na zkušebních tyčích kruhového průřezu s průměrem 4.5; 6 a 10 mm. Zkoušky byly prováděny v teplotním rozmezí od -196°C do $+20^{\circ}\text{C}$ při rychlosti pohybu příčnicku $2\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. K chlazení bylo použito podobného zařízení (kryostatu) jako u zkoušky lomové houževnatosti. Byla zaznamenávána závislost síla-prodloužení. Ke zkoušce byl použit univerzální mechanický zkušební stroj Zwick o maximální síle 50 kN.

4.2.3 Zkouška rázem v ohybu

Byl zkoumán vliv geometrie a rychlosti zatěžování na houževnatost materiálu. Z tohoto důvodu byly provedeny zkoušky rázem v ohybu za různých teplot (-150 až $+50^{\circ}\text{C}$). Zkoušky můžeme považovat za dynamické protože probíhaly při rychlosti zatěžování cca $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Byly zkoušeny zkušební tyče typu Charpy s V-vrubem (CVN) na rázovém instrumentovaném kyvadlovém kladivu o celkové počáteční energii 300 J. Byla měřena nárazová práce a snímána závislost síla-přemístění síly (průhyb zkušební tyče).

4.2.4 Zkouška rázem v ohybu z malé výšky

Pro zjištění dynamické lomové houževnatosti byla použita modifikovaná zkouška rázem v ohybu. Pro zkoušku rázem v ohybu z malé výšky je používán anglický výraz „low blow test“. Rychlost dopadu břitu beranu v místě zkušební tyče se pohybovala kolem $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Pro zkoušku byly použity zkušební tyče typu Charpy s nacyklovanou trhlinou (tzv. "pre-cracked" Charpy - PCVN).

4.2.5 Statická zkouška v ohybu zkušebních tyčí Charpy

Pro určení kritického lomového napětí σ_{CF} bylo použito těles typu Charpy s V-vrubem staticky zatěžovaných třibodovým ohybem. Zatěžování bylo provedeno na zkušebním stroji Zwick. Byl pořízen záznam síla-čas.

4.2.6 Zkouška lomové houževnatosti malých těles

Určení teplotních závislostí lomové houževnatosti určené na standardních typech těles je velice náročná činnost jak z hlediska času, tak i finanční nákladnosti výroby těles. Proto bylo přistoupeno k statické zkoušce lomové houževnatosti třibodovým ohybem malých těles. Jako zkušební tělesa byly použity *PCVN* tyče, stejně jako při určení dynamické lomové houževnatosti. Pro zatěžování byl použit mechanický zkušební stroj ZWICK s maximální zátěžnou silou 50 kN. Zkouška probíhala rychlostí pohybu příčnicku $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Snímána byla síla v závislosti na čase, která byla následně přepočítána na průhyb tělesa.

4.2.7 Fraktografie a metalografie

Všechny lomové plochy byly zdokumentovány pomocí digitální makrofraktografie, která umožnila proměření délek trhlin popřípadě velikosti tvárného natržení (zvětšení původní délky trhliny jejím stabilním šířením bezprostředně před křehkým porušením). Pro detailnější fraktografickou analýzu bylo použito světelné a rastrovací elektronové mikroskopie. Metalografické práce byly provedeny na metalografických vzorcích odebraných vždy z těles pro zkoušku třibodovým ohybem zkoušených při jedné teplotě majících hodnotu lomové houževnatosti v horní nebo dolní části rozptylu.

4.3 Zpracování dat z měření

Pro umožnění větší přesnosti a efektivnosti při měření a vyhodnocování mechanických zkoušek byl vyvíjen soubor programů, které by pracovali s novou měřicí kartou v grafickém prostředí operačního systému Windows. Měřicí část byla naprogramována v grafickém programovacím jazyku LabView a obsluhuje dvě měřicí osciloskopické karty. Vyhodnocovací část byla naprogramována v databázovém prostředí Delphi a je řešena modulově, kde každý modul tvoří jeden typ zkoušky. Tato část má pracovní název LDC (Laboratory Data Cruscher). Vše je zastřešeno databází naměřených a vypočtených hodnot, se kterými lze dále pracovat, což umožňuje jednoduchou adaptaci na jiný postup výpočtu (např. vyhodnotit podle aktualizované normy starší data), nebo možnost vytvoření např. expertního systému využívajícího naměřená data. Hlavním úkolem této databáze je jednoduchá

archivace všech naměřených i vypočtených veličin včetně pořízených makrosnímku lomových ploch ze všech prováděných zkoušek v laboratoři.

5 VÝSLEDKY A DISKUSE

5.1 Lomové chování duplexní oceli

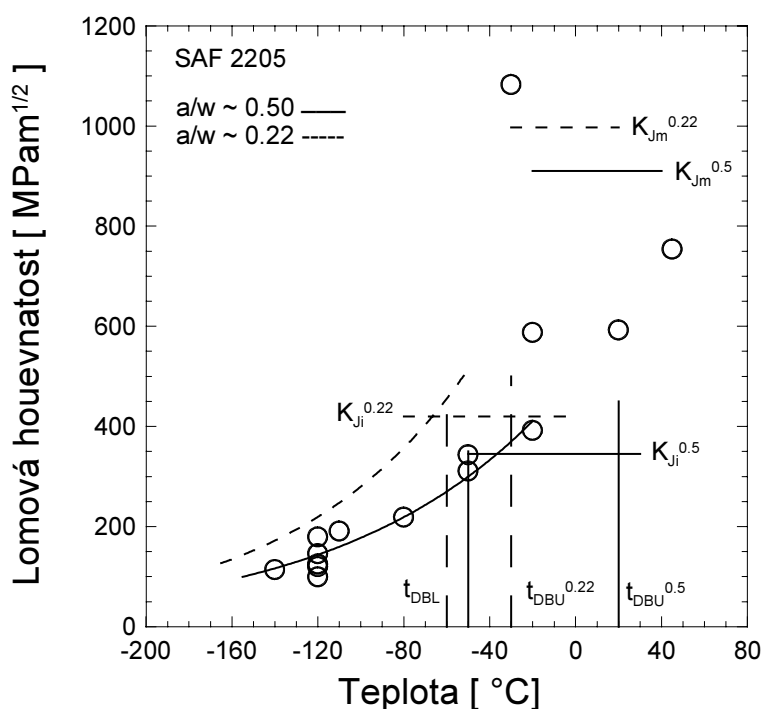
5.1.1 Mikromechanismus lomu

Po důkladné analýze je ještě více patrný kompozitní charakter chování nerezavějící duplexní oceli. Jak ukázaly analýzy příčných řezů nedolomenými tělesy, jak ferit, tak i austenit se v průběhu zatěžování nad mezí kluzu deformují rovinným skluzem. Přenos skluzu mezi zrny feritu a austenitu je podmíněn relaxací napětí vznikajícího v důsledku neslučitelnosti deformace mezi oběma fázemi (vyplývá z rozdílu tvrdosti a krystalografických systémů, zvláště však při nízkých teplotách, kdy se u feritu dostavuje tranzitní chování u austenitu nikoli). Nemůže-li dojít k přenosu skluzu mezi oběma sousedními zrny (tj. skluzový systém austenitu neodpovídá ani jednou rovinnou skluzového systému feritu) jediné nukleace štěpné trhliny ve feritu povede k uvolnění lokálních napětí. Iniciace štěpného lomu tedy nastává ve feritickém zrně. Většinou se jedná o vznik zárodku štěpné trhliny v průřezu deformačních dvojčat. Po vzniku zárodku štěpné trhliny se tato trhlina rozšíří přes celé feritické zrno a zastaví se na hranici s austenitem. Poté se čelo trhliny zaobljuje plastickou deformací okolního austenitu. Austenit působí jako matrice, která přemostuje již prasklá feritická zrna a tím působí proti dalšímu šíření trhliny. U tohoto materiálu dochází k takzvané delaminaci podél feritických zrn ve směru rovnoběžném se směrem válcování. Delaminace spotřebovává také velké množství energie a tím zvyšuje nároky na velikost zatížení, při kterém se bude nestabilně šířit magistralní trhlina.

5.1.2 Ekvivalence účinků z křehnutí

Jak je známo z literatury [Marrow 96], existuje jistý vztah mezi zvýšením tvrdosti feritických zrn a snížením hodnoty nárazové práce. Existují dva způsoby jak zvyšovat tvrdost respektive mez kluzu ve feritických zrnech. Prvním a v praxi velmi významným je pokles teploty, tj. teplotní zpevnění. Další možný způsob je zpevnění pomocí tzv. zkřehávacího žíhání, ve kterém dochází k precipitaci nekoherentních fází. U obou způsobů zpevnění feritické fáze byl pozorován stejný mechanismus iniciace štěpné trhliny.

5.1.3 Lomová houževnatost



Obr. 3 Porovnání teplotních závislostí lomové houževnatosti $a/W=0,5$ a $0,22$ u nerezavějící duplexní oceli SAF2205

Lomové charakteristiky zjištěné na tělesech s mělkou trhlinou vykazovaly poněkud odlišné chování než u standardních těles. Na obr. 3 je porovnání obou teplotních závislostí lomové houževnatosti. Vyšších hodnot lomové houževnatosti bylo dosaženo u těles s krátkou trhlinou, jak je zřetelné z průběhů exponenciálních závislostí, které byly proloženy pomocí metody nejmenších čtverců experimentálními body ležícími v tranzitní oblasti u obou zkoumaných typů zkušebních těles. Byl zaznamenán posun tranzitní oblasti směrem k nižším teplotám. Rozdíl je kvantifikován posunem tranzitních teplot křehkosti t_{DBL} cca o 10 °C směrem k nižším teplotám pro krátkou trhlinu. Pro srovnání a kvantifikování rozdílu byl změřen soubor těles při jedné teplotě v oblasti spodních prahových hodnot. Tato teplota byla stanovena tak, aby docházelo k porušení stejným mechanismem za předpokladu napětově kontrolovaného lomu. Soubor nebyl sice vzhledem omezenému množství experimentálního materiálu příliš rozsáhlý, ale základní kvantitativní pohled poskytl. Zvolená zkušební teplota byla -120°C.

5.2 Lomové chování C-Mn oceli na odlitky

5.2.1 Mikromechanismus lomu

U C-Mn oceli na odlitky byl při zkušební teplotě, při které byl získán statisticky významný soubor hodnot lomové houževnatosti, předpokládán napětově kontrolovaný transkrystalický štěpný lom s mikromechanismem iniciace křehkého porušení využívajícím karbidickou částici jako trigerující místo. Tento předpoklad byl částečně podpořen zevrubnou fraktografickou analýzou lomových ploch u všech typů těles použitých pro určení lomové houževnatosti třibodovým ohybem. Z fraktografické analýzy je patrné, že k iniciaci křehkého porušení nebylo v každém případě využito pouze jedno iniciační místo, i když není v silách této analýzy zjistit, které z míst bylo prvotní a jestli trigerovaly porušení na sobě nezávisle nebo se jednalo o sekundární iniciační místa, tj. místa ze kterých iniciovalo porušení až v důsledku nestabilního růstu trhliny v jejich blízkosti. Podle povahy lomové plochy šlo zřejmě o mechanismus lomu vycházející z porušení nejslabšího místa tzv. „weakest link“. Argument, který by zcela vyvrátil hypotézu o karbidickém mikromechanismu iniciace křehkého porušení nebyl zjištěn. Je však možné, že se jednalo o kombinovaný karbidicko-dislokační mechanismus porušení.

Díky tepelnému interkritickému zpracování byla výrazně zjemněna struktura daného materiálu. Z výchozího stavu obsahujícího 15% perlitu vyloučeného v ostrůvcích po hranicích zrn feritu se po aplikování interkritického tepelného zpracování transformoval perlit na tzv. degenerovaný perlit a místy i na jehlice horního bainitu. Zjištěné karbidy kulovitého nebo jehlicovitého tvaru dosahovaly velikosti maximálně několika jednotek mikrometrů. U lité struktury tlustostěnného odlitku jde o velmi jemné karbidy tvořící ostrůvky, místy by se dalo hovořit o síťoví.

Analýzou snímků struktury získaných ze světelné i elektronové mikroskopie metalografických výbrusů naleptaných 5% roztokem nitalu byly získány informace o velikosti zrn. Bylo zjištěno, že tavba I měla hrubší zrna ve struktuře než tavba II.

Kvantitativní posouzení množství a velikosti dutin vyžadovalo důkladnou přípravu povrchu výbrusu tak, aby nedocházelo k deformaci dutin a jejich okolí. U vzorků zhotovených z materiálu tavby I byl zjištěn značně větší objemový podíl dutin než u vzorků z materiálu tavby II (tavba I cca 0.9% analyzované plochy, tavba II cca 0.45% analyzované plochy).

Větší dutiny se vyskytují pouze ojedinele a jejich průměr dosahuje několik desítek mikrometrů. Velikost „velkých“ dutin je srovnatelná s rozměry některých zrn,

v některých případech je i větší, což může významně ovlivnit lomové chování při výskytu v tzv. procesní zóně.

5.2.2 Zátěžná křivka

Velmi důležitým aspektem ovlivňujícím lomové chování je rozptyl mechanických charakteristik. Tento rozptyl je nevyhnutelný vlivem nehomogenosti struktury daného materiálu. Rozdíly byly pozorovány v oblasti prvních plastických deformací v průběhu závislosti síly na deformaci zjištěné zkouškou jednoosým tahem.

Byly zkoušeny dva způsoby definice zátěžné křivky implementované do výpočtů metodou konečných prvků v systému ABAQUS [Novák 01, Vlček 01]. Nejprve byla testována "reálná" zátěžná křivka, tzn. křivka získaná ze zkoušky tahem, zadávaná body pro výpočet pomocí inkrementální teorie plasticity. Jako druhá náhrada byla použita křivka sestavená podle rovnice Ramberga-Osgooda a do modelu implementována jako kontinuálně zpevňující materiál.

5.2.3 Odolnost proti porušení u CVN těles

Zkouška rázem v ohybu patří již mezi standardní zkoušky hodnotící odolnost materiálu proti porušení. Tato zkouška se nejvíce používá jako srovnávací test dvou a více materiálů. Z tranzitních křivek zjištěných na C-Mn oceli na odlitky tavby I a II je patrný posun křivek. Tranzitní křivka u tavby I je posunuta cca o 40°C směrem k vyšším teplotám proti křivce stanovené pro tavbu II (odběrové místo C a E). Rozdíl mezi tranzitními křivkami stanovenými pro tavbu II, na zkušebních tyčích odebraných ze středové oblasti (C) a povrchové oblasti (E), je zanedbatelný.

Vliv rychlosti zatěžování

Je známo, že rostoucí rychlost zatěžování má obdobný účinek jako snížení teploty. Vliv rychlosti zatěžování byl studován, na C-Mn oceli na odlitky tavby I, při třech rozdílných rychlostech. Jednalo se o zkoušku rázem v ohybu (5 m.s^{-1}), zkoušku rázem v ohybu z malé výšky (1 m.s^{-1}) a statickou zkoušku ohybem ($0.0000166 \text{ m.s}^{-1}$). K porovnání sloužily závislosti charakteristických sil. Z těchto závislostí byly určeny tranzitní teploty křehkosti t_{gy} , pro případ rovnosti lomové síly se silou na mezi makroplastických deformací. Bylo zjištěno, že k lomu na mezi makroplastických deformací dochází, při zvýšení rychlosti zatěžování ze statického na dynamické, při teplotě o 85°C vyšší. Znalost vlivu rychlosti na lomové chování je důležitým podkladem pro volbu materiálu vzhledem k budoucímu namáhání konstrukce.

5.2.4 Lomová houževnatost

Jednotlivé teplotní závislosti lomové houževnatosti zjištěné na materiálu modelu kontejneru (tavba I) pro tři různé délky trhlin se stejným nosným příčným průřezem před čelem trhliny jsou v grafické podobě vyneseny na *obr. 4*. Z obrázku jsou patrné trendy lomového chování podobné trendům zjištěným v případě duplexní nerezavějící oceli. I když je tato ocel zařazována mezi nízkouhlíkové, její minimální hodnota lomové houževnatosti K_{Ic} odpovídá dvojnásobku obvykle dosahovaných hodnot u tohoto typu oceli.

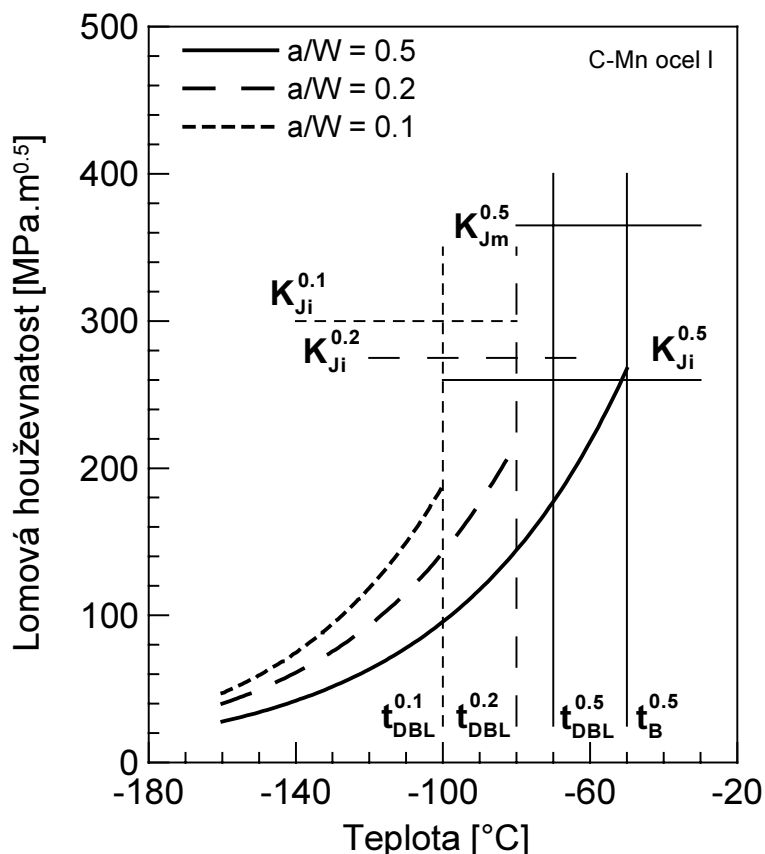
Posun hodnot lomové houževnatosti reprezentovaný posunem mezi teplotami křehkosti pro jednotlivé délky trhliny není lineárně závislý na délce trhliny. Je patrné, že se zkracující se délkou trhliny, bude teplota křehkosti posouvána směrem k nižším teplotám rychleji, u delších trhlin tomu bude právě naopak.

Zjištěné hodnoty lomové houževnatosti pro okamžik iniciace stabilního růstu trhliny K_{Ji} vykazují obdobné chování.

Stejně jako u duplexní nerezavějící oceli i v tomto případě byly analyzovány soubory těles, zkoušené při stejné teplotě, pro kvantifikování rozdílů mezi jednotlivými délkami trhlin. Pro C-Mn ocel na odlitky byla zvolena teplota -100°C .

Z analýzy rozptylu provedené na těchto souborech dat je patrné nesymetrické rozdělení hodnot. Daným souborům hodnot lomové houževnatosti, získaných na tělesech s různou délkou trhliny za stejné zkušební teploty, odpovídá nejlépe rozdělení logaritmicko normální.

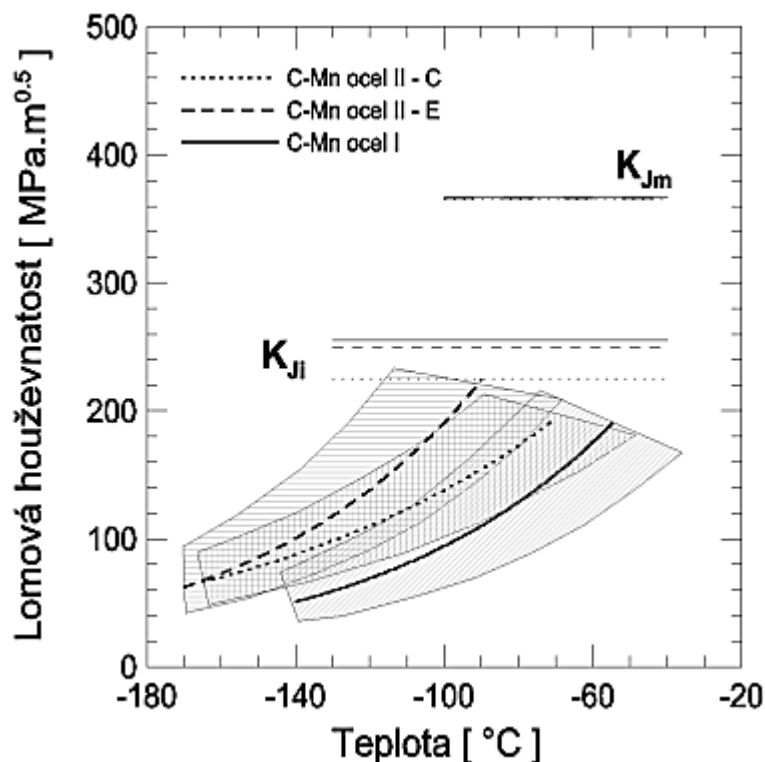
Na zkušebních tělesech z materiálu získaného z nálitku modelu kontejneru (tavba II), byla stanovena teplotní závislost lomové houževnatosti na teplotě pro tělesa ze středu odlitku označená jako série C a z boku označená jako E. Porovnáním obou teplotních závislostí byl zjištěn posun celé tranzitní oblasti hodnot lomové houževnatosti zjištěné na sadě těles zkoušených při jedné teplotě o cca 10°C směrem k vyšším teplotám pro sérii C. Snížení lomové odolnosti u těles odebraných ze středu odlitku je vysvětlitelné obecně horší mikrostrukturou ve středu odlitku, kde dochází k segregaci nízkotavitelných fází a většímu objemovému podílu dutin.



Obr. 4 Porovnání teplotních závislostí lomové houževnatosti pro různé délky trhlin s vyznačením charakteristických hodnot pro C-Mn ocel I

Větší rozdíl v hodnotách lomové houževnatosti můžeme nalézt při porovnání teplotních závislostí lomové houževnatosti stanovených na materiálech tavby I a tavby II (obr. 5). Materiál tavby I vykazuje horší lomově-mechanické vlastnosti. Tento rozdíl je patrný i u zjištěných deformačních a napěťových charakteristik.

Jak již bylo řečeno dříve, před tepelným zpracováním byla feritická fáze zastoupena přibližně 85% objemového podílu ve struktuře. Obdobný procentuální podíl feritické fáze byl zjištěn u všech vyšetřovaných metalografických výbrusů, odebraných z těles po tepelném zpracování. Z toho plynoucí patnácti procentní podíl, odpovídající karbidické fázi, byl rozmístěn v ostrůvcích na hranicích feritických zrn. Z analýzy velikosti zrn je patrný zřetelně vyšší počet zrn s větším průměrem u série B z tavby I než u ostatních sérií. Pokud vezmeme v úvahu, že analyzovaná oblast měla přibližně stejnou velikost, je i relativně menší nárůst výskytu velkých zrn velmi významný oproti rozdílům zjištěným v oblastech se zrny menších rozměrů.



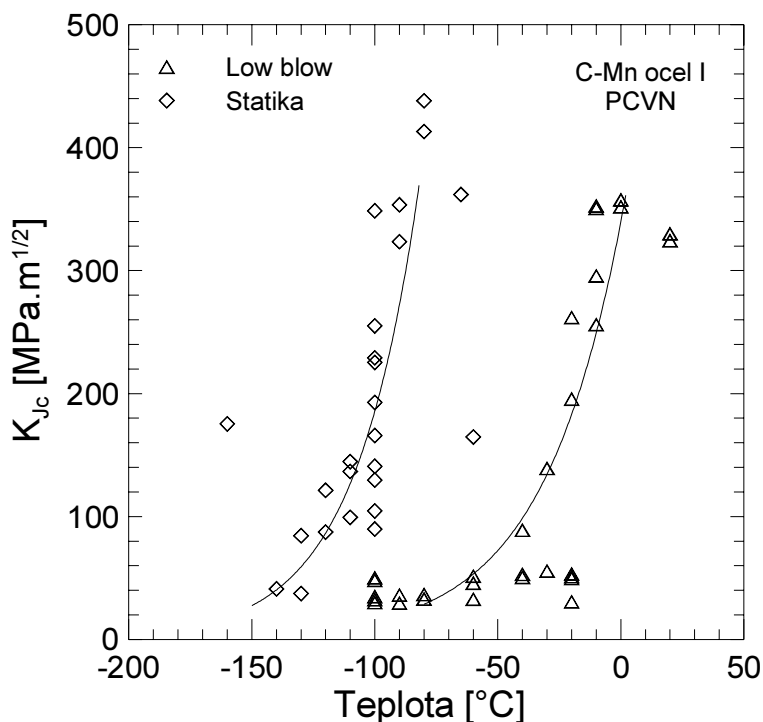
Obr. 5 Porovnání teplotních průběhů lomové houževnatosti, C-Mn ocel I a II

Hlavní příčinou rozptylu je náhodná složka závislá na statistické povaze štěpného lomu. Tuto statistickou povahu lze objasnit pomocí modelu mikromechnizmu porušení. Pokud tedy přijmeme hypotézu, že šlo o porušení nejslabšího článku tzv. „weakest link“, je výběr nejslabšího místa, které se dostane do oblasti s vhodnými napěťovými podmínkami, aby mohlo dojít k iniciaci křehkého porušení štěpením, náhodným jevem, který má již svůj rozptyl. Další nezanedbatelnou složkou rozptylu byla mikrostruktura, která v lité oceli není zcela homogenní, i když velké množství nehomogenit bylo odstraněno tepelným zpracováním. Rozdíly zjištěné mezi středem a povrchem u C-Mn oceli na odlitky (tavba II) byly relativně menší než bývá obvyklé u podobně rozměrných odlitků. Také objemový podíl dutin byl u materiálu z tavby I kolem 1% a u tavby II se blížil 0.5%. Byl zjištěn rozdíl mezi distribucí dutin u C-Mn oceli na odlitky I z horní a dolní oblasti rozptylu při stejném objemovém podílu. U vzorku z dolní oblasti byl zjištěn větší podíl dutin malých rozměrů oproti větším dutinám u vzorku z horní oblasti rozptylu hodnot lomové houževnatosti.

5.2.5 Vliv rychlosti zatěžování na lomové chování

Pro stanovení lomové houževnatosti na tělesech Charpy s trhlinou při větší rychlosti než je kvazistatická (rychlost pohybu příčnicku $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) bylo použito zkoušky rázem v ohybu z malé výšky (rychlost při dopadu beranu $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, tj.

60000 mm.min⁻¹). Vyhodnocením zkoušky rázem v ohybu z malé výšky (low blow test) byly získány hodnoty dynamické lomové houževnatosti.



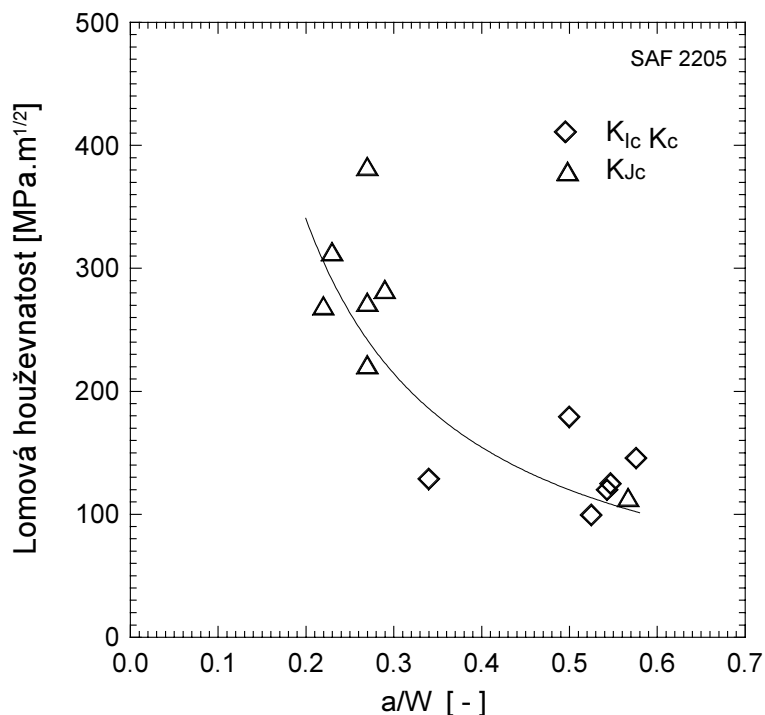
Obr. 6 Porovnání teplotních průběhů lomové houževnatosti zjištěné na **PCVN** tělesech při různé rychlosti zatěžování

Jak je zřejmé z obr. 6, pro dynamické zatěžování došlo ke značnému posunu tranzitní křivky směrem k vyšším teplotám. Tento posun tranzitních oblastí činil přibližně 70°C. Pokud porovnáme rozdíl zjištěný na tělesech s trhlinou s rozdílem zjištěným na tělesech s vrubem, pak dojdeme k závěru, že trhlina je mnohem citlivější na rychlost zatěžování než vrub. Pokud se tedy v konstrukci nachází trhlina a dojde k dynamickému zatížení může se porušit křehce i v případě, že dosahuje dostatečně vysoké hodnoty statické lomové houževnatosti stanovené při provozní teplotě. U těles **PCVN** byla také pozorována užší tranzitní oblast z hlediska teplot než u standardních těles pro stanovení lomové houževnatosti.

5.3 Vliv délky trhliny na lomové chování

Při návrhu experimentu pro studium vlivu délky trhliny na lomové chování se vycházelo z předpokladu stejné velikosti nosného příčného průřezu pod čelem předem nacyklované trhliny. Geometrická podobnost byla zachována u poměru výšky k délce zkušební tělesa, který byl stanoven stejný, jaký je doporučený pro standardní zkušební tělesa 1:4. Z globálního pohledu nedošlo ke změně způsobu

zatěžování a výsledky experimentálního určení hodnot lomové houževnatosti by měly být podobné pro všechny použité typy zkušebních těles. Toto tvrzení by mohlo platit, kdyby byl zatěžování podroben vždy stejný objem v okolí čela trhliny. Tento předpoklad zřejmě nebyl splněn z důvodu rozdílných okrajových podmínek, jakými jsou například volné povrchy.



Obr. 7 Vliv délky trhliny na hodnotu lomové houževnatosti určené při teplotě -120°C u duplexní oceli SAF 2205

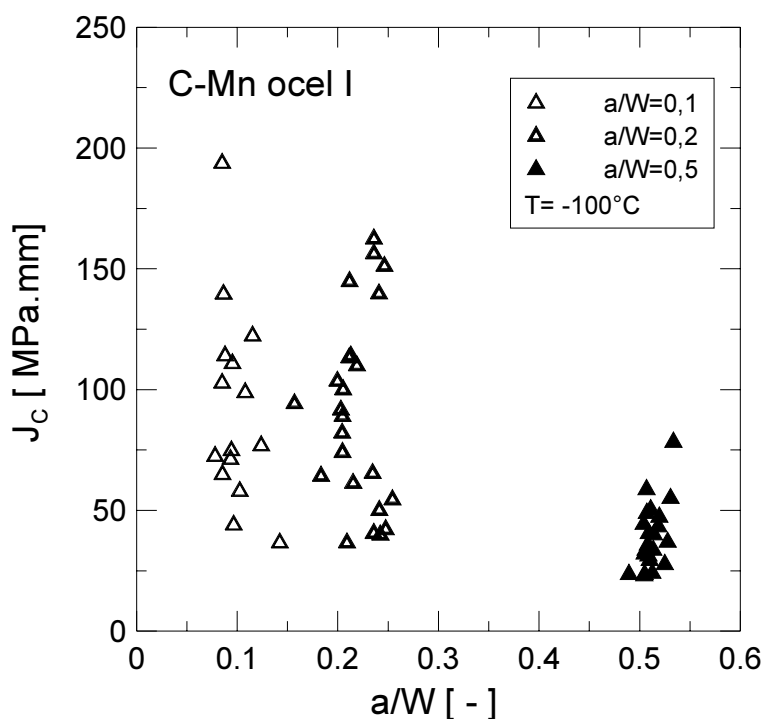
5.3.1 Duplexní ocel

Pro stanovení vlivu délky trhliny na lomové chování byla sestrojena závislost hodnot lomové houževnatosti na skutečné délce trhliny naměřené po zlomení zkušebního tělesa (obr. 7). Do závislosti byly zahrnuty všechny naměřené hodnoty lomové houževnatosti při stejné zkušební teplotě, kterou byla teplota -120°C . Při výpočtu hodnot lomové houževnatosti bylo použito výpočtu používaného pro standardní délku trhliny, ve kterém se měnil pouze geometrický faktor v závislosti na délce trhliny a rozměrech zkušebního tělesa. Ze závislosti je patrné, že s klesající délkou trhliny vzrůstá naměřená hodnota lomové houževnatosti. Trend průběhu hodnoty lomové houževnatosti v závislosti na délce trhliny vyjadřuje exponenciální závislost proložená metodou nejmenších čtverců. Za významné lze považovat zjištění, že kratší trhlina je méně nebezpečná než trhlina delší. Tento jev je pozorován i přesto, že všechna tělesa měla „stejný“ nosný příčný průřez pod čelem

trhliny. Z toho vyplývá, že nárůst hodnot lomové houževnatosti se zmenšující se délkou trhliny musí být spatřován v lokální změně stavu napjatosti na čele trhliny.

5.3.2 C-Mn ocel na odlitky

U nízkouhlíkové manganové oceli na odlitky byla lomová houževnatost měřena na třech typech zkušebních těles odlišujících se poměrem délky trhliny k výšce tělesa a tím i ostatních rozměrů navazujících na výšku, za předpokladu stejného nosného průřezu před čelem trhliny. Po naměření teplotních závislostí lomové houževnatosti byla vybrána teplota v oblasti spodních prahových hodnot tak, aby u všech typů zkušebních těles docházelo k porušení stejným mechanismem. Tato teplota byla stanovena na -100°C a byla při ní odzkoušena sada těles pro každý typ tělesa. Ze získaných hodnot lomové houževnatosti byla sestrojena závislost na délce trhliny respektive na poměru této délky k výšce tělesa (*obr. 8*).



Obr. 8 Vliv délky trhliny na hodnotu lomové houževnatosti určené při teplotě -100°C u C-Mn oceli na odlitky I

Z této závislosti je patrné poměrně značné zvýšení maximálních hodnot lomové houževnatosti naměřené u těles s kratší trhlinou než je standardní délka. Je vidět, že u minimální hodnoty lomové houževnatosti získané ze statistického souboru měření dochází ke zvýšení jen minimálně. Z toho plyne zvětšení intervalu rozptylu ve kterém se může pohybovat naměřená hodnota lomové houževnatosti u těles

s krátkou trhlinou proti velikosti rozptylu lomové houževnatosti získaného na standardních tělesech.

Pokud podrobíme naměřené soubory hodnot lomové houževnatosti statistické analýze, zjistíme, že zvýšení lomové houževnatosti, pozorované u souboru těles s poměrem délky trhliny a výšky tělesa rovným 0.1 vzhledem k hodnotám získaným na tělesech s poměrem $a/W=0.2$, není již tak prokazatelný, jako rozdíl vzhledem k standardním tělesům.

5.4 Účinky constraint

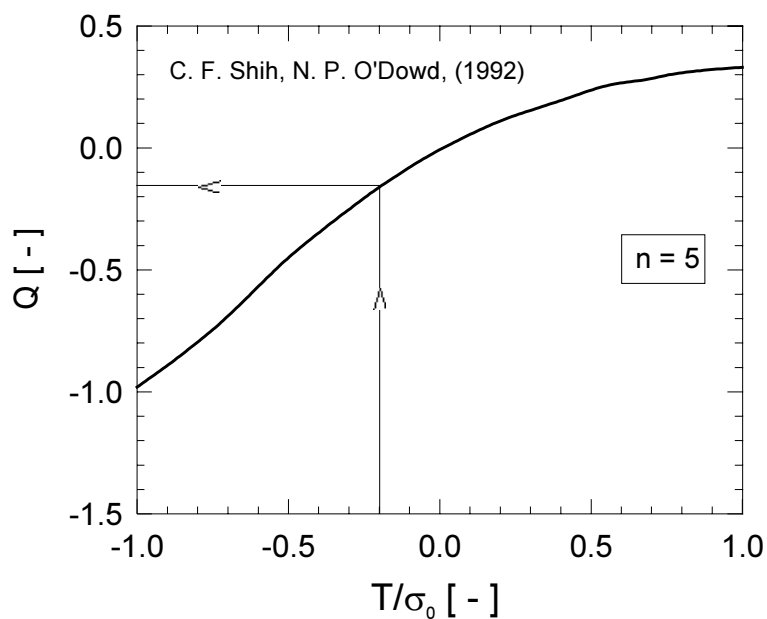
Lomové chování u těles s krátkou trhlinou vykazuje výrazné rozdíly při hodnocení pomocí klasické lomové mechaniky, která používá k popisu lomového chování kritickou hodnotu součinitele intenzity napětí K_I pro lineárně elastické chování a hodnotu J -integrálu pro elasto-plastické chování. J - Q závislost popisuje lomové chování pomocí dvouparametrové lomové mechaniky. Pro určení J - Q závislosti je nutné stanovení Q -parametru charakterizujícího constraint na čele trhliny. Constraint parametr je možné stanovit jako diferenci napěťových polí nebo výpočtem pomocí T -napětí. V prvním případě je nezbytná znalost distribuce napětí před trhlinou za stavu plastické zóny malých rozměrů a distribuce napětí vypočtená na tělese s danou geometrií.

5.4.1 Stanovení Q -parametru z T -napětí

Určení T -napětí pro známou geometrii není příliš složité, pokud jsou známy hodnoty geometrických faktorů β pro dané geometrie. Pro případ třibodového ohybu s různou délkou trhliny jsou tyto hodnoty tabelované například v práci Knésl - Bednář [Knésl 97]. Po odečtení jednotlivých geometrických faktorů bylo přistoupeno k výpočtu T -napětí podle vztahu

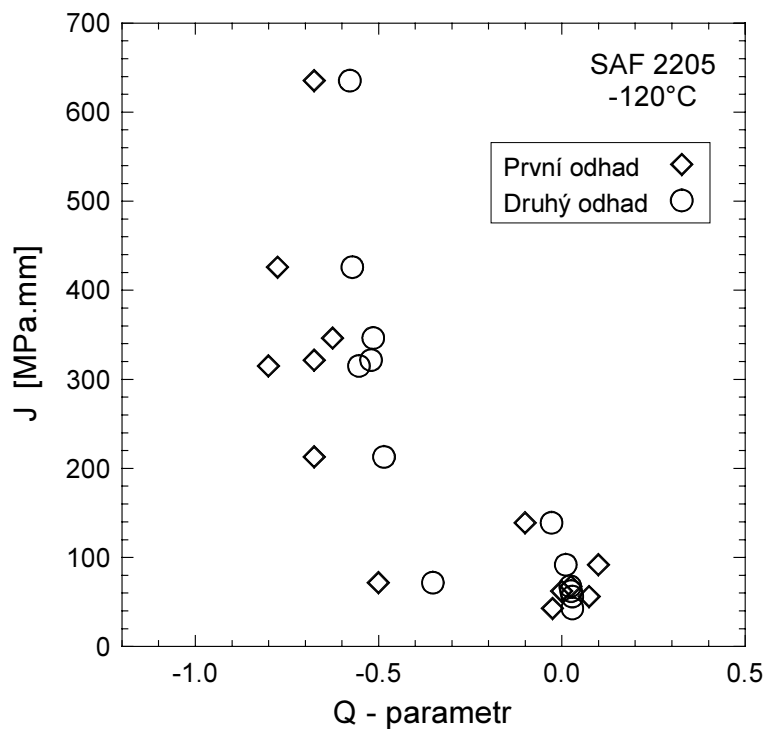
$$T = \beta \frac{K}{\sqrt{\pi a}}, \quad (1)$$

kde β je geometrický faktor, K je hodnota faktoru intenzity napětí, a je délka trhliny.



Obr. 9 Závislost Q -parametru na T -napětí

V tomto okamžiku bylo nutné použít numerické výpočty pro vztah mezi T -napětím a Q -parametrem. V práci Shiha a O'Dowda [Shih 92] jsou ukázány tyto výpočty pro jednotlivé typy těles a různé hodnoty exponentu deformačního zpevnění. Před použitím T - Q závislosti, která je vynesena na obr. 9, bylo nutné znormovat vypočtené T -napětí hodnotou meze kluzu při zkušební teplotě.



Obr. 10 Porovnání obou metod odhadu Q -parametru

Existuje ještě jeden přístup, jak poměrně snadno určit hodnotu Q -parametru pro hodnotu lomové houževnatosti změřenou na tělese s danou délkou trhliny. Pro druhý způsob odhadu hodnoty Q -parametru lze využít výsledků z *MKP* analýzy autorů O'Dowda a Shiha, kteří publikovali řadu závislostí Q -parametru na hodnotě lomové houževnatosti a délce trhliny pro širokou škálu koeficientů deformačního zpevnění [O'Dowd 94].

Výsledky získané oběma těmito postupy jsou uvedeny na *obr. 10*. V podstatě se potvrzuje základní trend růstu hodnot lomové houževnatosti s klesajícím účinkem constraint.

5.4.2 Výpočet Q -parametru

Výpočet pole napětí v blízkosti čela trhliny stav SSY

Pro určení rozložení pole napětí ve stavu plastické zóny malých rozměrů, tj. při nulové úrovni constraint, bylo užito modifikované metody hraniční vrstvy *MBL* (Modify Boundary Layer method). Úloha byla řešena jako „nekonečně velké těleso s trhlinou“. O této problematice výpočtu pojednává například Ruggieri [Ruggieri 96]. Pro C-Mn ocel na odlitky I spočítal průběhy napětí pod čelem trhliny Novák [Novák 01, Novák 98] (inkrementální teorie plasticity) a Vlček [Vlček 00, Vlček 01] (deformační teorie plasticity) v systému ABAQUS. Takto získaný průběh maximálního hlavního napětí vstupoval do dalších výpočtů Q -parametru.

Výpočet pole napětí v blízkosti čela trhliny

V předchozí kapitole byl naznačen postup výpočtu průběhů napětí ve stavu plastické zóny malých rozměrů u nekonečně velkého tělesa. Při zkoušce lomové houževnatosti docházelo k zatěžování tělesa konečných rozměrů. Pro tento případ musel být vytvořen model tělesa tak, aby geometricky odpovídal reálnému tělesu. Díky využití symetrie, jak v příčném, tak i v podélném směru byla modelovaná pouze jedna čtvrtina tělesa.

Jak bylo odzkoušeno, volba zátěžné křivky má velký vliv na výsledné průběhy napětí. Proto byly pro výpočet zvoleny zátěžné křivky, které nejlépe popisovaly průběh zatěžování u všech typů těles, což je nezbytné pro porovnatelnost výsledků.

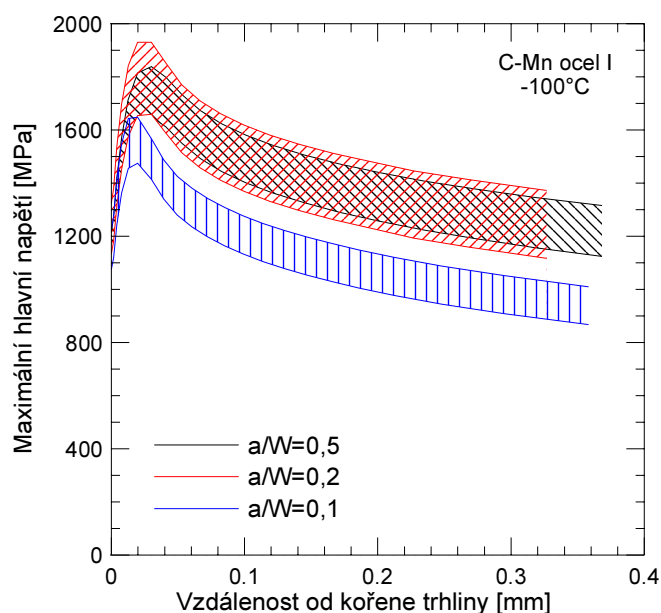
Veškeré výpočty pro C-Mn ocel na odlitky I provedl Novák (inkrementální teorie plasticity) a Vlček (částečně inkrementální teorie plasticity a deformační teorie plasticity) v systému ABAQUS pod vedením Kozáka. Primární výsledky a detailně popsaná metodika výpočtu je uvedena v jejich pracích, které se touto problematikou zabývají detailněji [Kozák 98, Novák 01, Vlček 01].

Stav napjatosti na čele trhliny

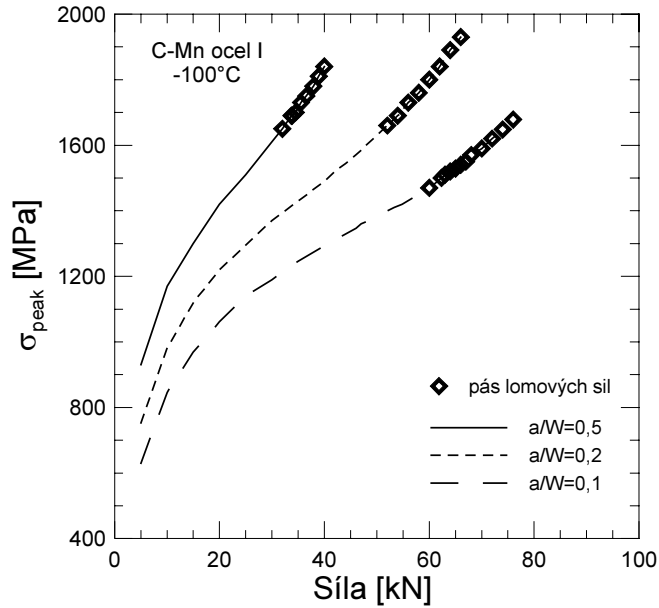
Experimentálně stanovené hodnoty lomové houževnatosti u všech typů zkušebních těles popisují z globálního hlediska jaký byl stav napjatosti na čele trhliny v okamžiku lomu. Ke stejné hodnotě lomové houževnatosti lze dospět různým rozložením napětí na čele trhliny. Jak bude rozložení napětí v daném případě vypadat, záleží na mnoha činitelích. Jedním z nich může být samotný materiál, další geometrie, způsob zatěžování, vliv okolí atd..

Byl sledován vliv délky trhliny na stav napjatosti na čele trhliny. Jako nejvhodnější pro posouzení tohoto vlivu se ukázal výpočet trojrozměrného modelu tělesa pomocí deformační teorie plasticity.

Pásky zahrnující průběhy napětí v jednotlivých krocích zátěžné síly pro změřený rozptyl lomových sil, zjištěný u jednotlivých typů zkušebních těles za teploty -100°C , jsou vyneseny na *obr. 11*. S rostoucí zátěžnou silou aplikovanou na těleso se zvyšuje celková úroveň napětí. Co se týká rozdílů v průbězích napětí, mezi jednotlivými typy těles dochází nejprve k zvýšení úrovně napětí s klesající délkou trhliny ($a/W = 0.5$ X $a/W = 0.2$) a následně k poklesu napětí u tělesa s $a = 2.5$ mm ($a/W = 0.1$). Aby bylo možné lépe postihnout trend vývoje napětí na čele trhliny, byla sestrojena závislost maximální hodnoty napětí na velikosti zátěžné síly. Tato závislost je ukázána na *obr. 12* a jsou v ní vyznačeny síly, které odpovídají lomovým silám u odzkoušených těles. I zde je patrný pokles maximálního hlavního napětí u křivky pro tělesa s nejkratší délkou trhliny.

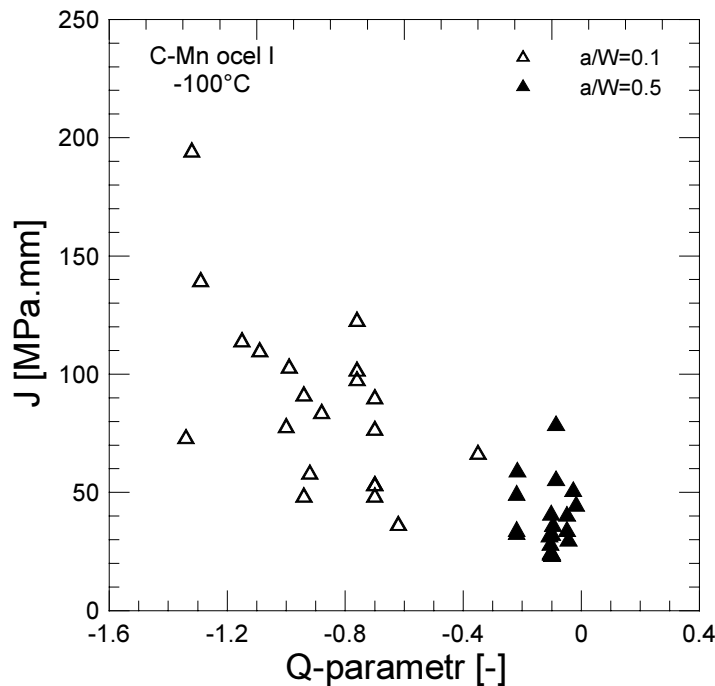


Obr. 11 Průběh napětí na čele trhliny pro různá tělesa



Obr. 12 Závislost maximálních hodnot napětí na zátěžné síle

Z analýzy stavu napjatosti a deformace na čele trhliny je patrné, že jak tvar a rozdělení napětí, tak i deformace, se mění. S klesající délkou trhliny se oblast stejných napětí prodlužuje a sklání směrem ke směru šíření trhliny. Velikost plastické zóny se vzrůstající délkou trhliny se zmenšuje. Jak bylo zjištěno oblast plastické deformace u tělesa s $a/W = 0.1$ „prorůstá“ až na povrch, čímž dochází k větší relaxaci napětí, než když by plastická oblast zůstala „uzavřená“ v tělese.



Obr. 13 J-Q závislost pro Q-parametr určený z F_C (ITP)

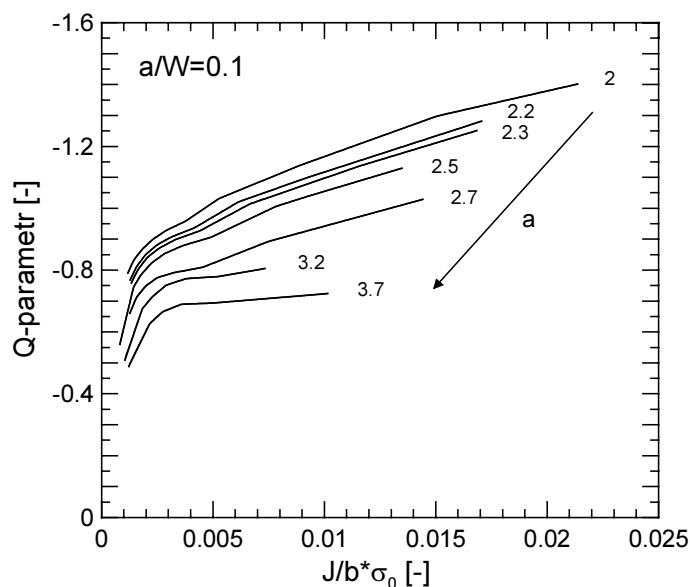
Standardní postup stanovení Q -parametru

Průběhy maximálního hlavního napětí byly znormalizovány mezi kluzu a vzdálenost od čela trhliny r byla znormalizována do bezrozměrných souřadnic. Pokud takto upravené křivky vyneseme spolu s průběhem maximálního hlavního napětí vypočteného pro stav SSY , např. pomocí MBL , můžeme odečíst hodnotu Q -parametru. Protože celá teorie popisu stavu napjatosti na čele trhliny pomocí dvou parametrů J a Q je založena na podmínce podobnosti distribuce napětí (self-similar stress fields condition) na čele trhliny, bylo nutné ověřit její splnění.

Standardní přístup k určení Q -parametru vychází z experimentálně určené lomové síly, pro kterou se provede určení Q -parametru z výpočtu napětí před čelem trhliny. J - Q závislost určená z lomových sil je vynesena na obr. 13 pro tělesa s poměrem $a/W = 0.1$ a 0.5 (ITP). Do grafu nebyla zahrnuta tělesa s poměrem $a/W = 0.2$ díky nesplnění omezení platnosti podobnosti napěťových polí.

Modifikovaný postup stanovení Q -parametru

Po důkladném rozboru stanovení Q -parametru z lomové síly bylo zjištěno, že již velmi malá změna lomové síly může znamenat značnou změnu hodnoty lomové houževnatosti. Tato „nestabilita“ může vést k nesprávnému stanovení hodnoty Q -parametru. Aby byla odstraněna nestabilita přiřazení Q -parametru vzniklá použitím kritéria velikosti lomové síly, byl použit tzv. zatěžovací parametr (ZP). Myšlenka použití zatěžovacího parametru je založena na nalezení energetické rovnosti mezi experimentem a výpočtem. Zatěžovací parametr je dán vztahem

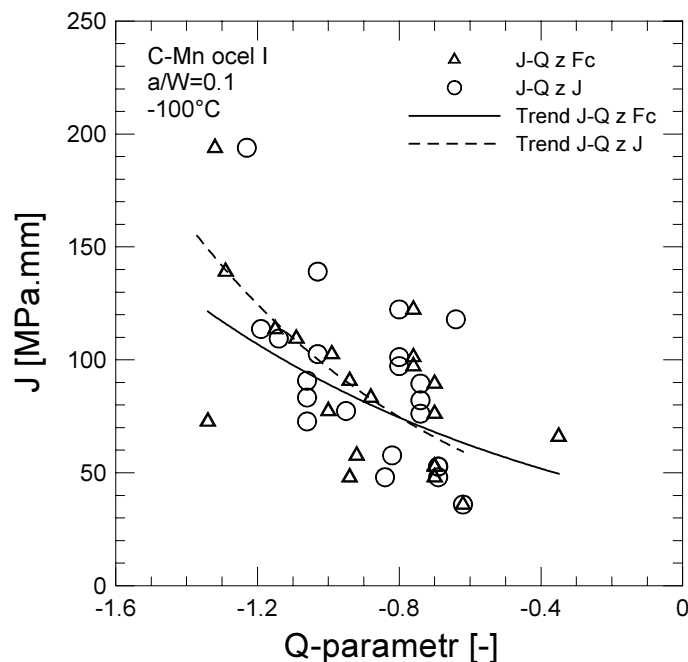


Obr. 14 Nomogram pro stanovení Q -parametru modifikovanou metodou

$$\text{zatěžovací parametr} = \frac{J}{b\sigma_0}, \quad (2)$$

kde J je hodnota J -integrálu, b je velikost ligamentu, σ_0 je mez kluzu.

Pro aplikaci modifikovaného postupu výpočtu je nezbytné vytvořit nomogramy vypočtených závislostí Q -parametru na zatěžovacím parametru. Soubor křivek pro různé délky trhlin u zkušební tělesa s nejkratší délkou trhliny je vyneseno na obr. 14. Na obr. 15 je znázorněna závislost lomové houževnatosti J na Q -parametru určeném modifikovanou metodou výpočtu pro těleso s poměrem $a/W = 0,1$. Do grafu jsou vyneseny i hodnoty získané standardní metodou výpočtu pomocí kritéria lomových sil.



Obr. 15 Porovnání standardního a modifikovaného přístupu k určení J - Q závislosti u těles s nejkratší délkou trhliny.

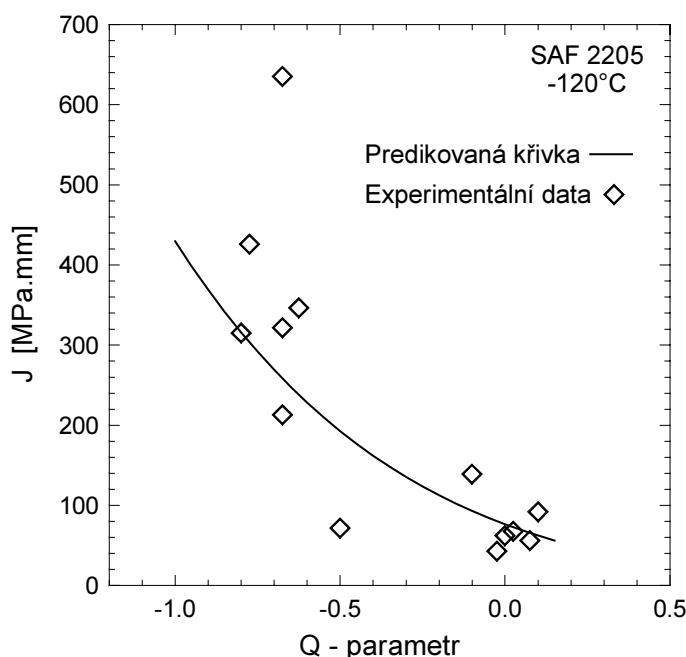
5.4.3 Predikce J - Q závislosti

Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, stanovení Q -parametru výpočtem pro každé zkušební těleso zvláště je velmi náročné a to nejen z hlediska nutnosti výpočtu stavu napjatosti na čele trhliny, například pomocí metody konečných prvků, ale i z hlediska časového, kdy je náročný jak samotný výpočet, tak i zpracování jeho výsledků. Proto byla hledána cesta, jak poměrně jednoduchým způsobem predikovat závislost lomové houževnatosti na hodnotě Q -parametru hodnotícího constraint na čele trhliny. Shih a O'Dowd [Shih 92] navrhli rovnici predikující tuto závislost. Předpokládali, že k porušení dojde pokud bude v kritické vzdálenosti X_0 překročeno

napětí rovnající se hodnotě kritického lomového napětí σ_{CF} . Toto kritérium porušení se také nazývá **RKR** model (podle jeho autorů Rice, Knot a Ritchie). Výsledná rovnice pro předpověď J - Q závislosti je ve tvaru

$$J_{Qc} = J_c \left(\frac{1 - Q\sigma_0}{\sigma_{CF}} \right)^{(N+1)}, \quad (3)$$

kde J_{Qc} je hodnota lomové houževnatosti, J_c je hodnota lomové houževnatosti při $Q = 0$, σ_0 je hodnota meze kluzu, σ_{CF} je hodnota kritického lomového napětí a N je Rambergův-Osgoodův exponent deformačního zpevnění.



Obr. 16 Porovnání predikované J - Q závislosti s experimentálními daty

Navržená rovnice byla aplikována na duplexní nerezavějící ocel SAF 2205. U duplexní oceli byly použity naměřené hodnoty lomové houževnatosti (určené na standardních zkušebních tělesech), hodnoty meze kluzu při dané teplotě, exponentu deformačního zpevnění a hodnoty kritického lomového napětí zjištěného na *CVN* tělesech. Pro určení kritického lomového napětí byla předpokládána iniciace porušení při použití kritéria dosažení kritické hodnoty tahového napětí. Tento předpoklad byl podpořen fraktografickou analýzou a již známými výsledky u podobných duplexních ocelí [Koledník 96, Marrow 97, Joly 95, Dlouhý 96A].

Průběh J_{Qc} podle rovnice (3) byl vyneseno do grafu (obr. 16) spolu s experimentálními hodnotami lomové houževnatosti a Q -parametrem určeným podle první metody odhadu (pomocí T -napětí). Z obrázku je evidentně patrná dobrá shoda mezi experimentálními hodnotami a predikovanou závislostí.

6 ZÁVĚRY

Předložená práce diskutuje problematiku lomového chování dvou typů ocelí se zaměřením na vliv napjatosti před čelem trhliny na odolnost vůči křehkému lomu a lomovou houževnatost. Nové poznatky jsou shrnuty do následujících závěrů:

V metodické oblasti:

- Byl vytvořen a v rámci experimentálního programu disertace odladěn softwarový systém pro vyhodnocování mechanických a lomově mechanických zkoušek (digitálního snímání a vyhodnocování měřených veličin) a archivaci výsledků.
- Pro materiál s výraznou plastickou deformací na mezi kluzu (C-Mn ocel I) byla zvládnuta metodika výpočtu Q -parametru podle jeho základní definice. Jako klíčová se pro výpočet jeví volba modelu (způsob řešení zaoblení čela trhliny a kontaktních ploch) a zatěžovací křivka.
- Byl modifikován výpočet Q -parametru pro materiály s výrazným rozptylem vlastností projevujícím se rozdílnými zatěžovacími křivkami (výrazně rozdílnou deformační prací předcházející lomu). Pro tyto účely byly sestrojeny nomogramy umožňujícími stanovení Q -parametru z kritické hodnoty zatěžovacího parametru definovaného v práci.

V oblasti hodnocení lomového chování sledovaných materiálů:

- Pro duplexní ocel byla zjištěna ekvivalence účinků zkřehnutí způsobeného snížením teploty a zkřehnutí způsobeného dlouhodobou expozicí při teplotách v okolí 475 °C.
- U duplexní oceli bylo potvrzeno lomové chování odpovídající materiálům kompozitního typu (vlastní mechanismus porušení, vznik trhlín kolmých k ose zatěžování – delaminace, dvě lokální maxima při zkoušce tahem, atypická morfologie lomových ploch).

- Pro C-Mn ocel byla stanovena teplotní závislost lomové houževnatosti včetně jejích rozptylových charakteristik. Z hlediska uvažovaných aplikací je pro materiál významná vysoká plasticita na čele trhliny (všechny hodnoty lomové houževnatosti lokalizovány v elastoplastické oblasti) a rozptyl lomových charakteristik v tranzitní oblasti.
- Průběh nárazové práce, popř. podílu tvárného lomu, u zkoušek rázem v ohybu realizovaných u obou taveb C-Mn oceli a u tavby II v obou odběrových místech vedly k hodnocení, které odpovídá závěrům zjištěným ze zkoušek lomové houževnatosti. Zkouška rázem v ohybu se přitom ukázala jako méně citlivá pro určení mikrostrukturních rozdílů mezi odběrovými místy u C-Mn oceli II.
- Pro C-Mn ocel byly zjištěny mikrostrukturní příčiny rozptylu lomových vlastností v tranzitní oblasti (lokální rozdíly ve velikosti feritických zrn, heterogenita ve velikosti a distribuci dutin u výchozího materiálu). Extrémně nízký rozdíl v lomovém chování povrchu a středových oblastí tlustostěnné desky tavby II je výsledkem jemnozrné feritické struktury získané normalizací z interkritického rozmezí teplot.
- U C-Mn oceli byla zjištěna vysoká citlivost materiálu na rychlost zatěžování. Ve sledovaném oboru rychlostí zatěžování ($1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ až $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) se s rostoucí rychlostí zatěžování oblast křehkého lomu a tranzitní oblast posouvá o více než 80°C k vyšším teplotám.

V oblasti vlivu constraint na iniciaci křehkého lomu a makroskopické charakteristiky lomu:

- U duplexní nerezavějící oceli byla navržena a s velmi dobrými výsledky otestována zjednodušená metoda stanovení Q -parametru pomocí T -napětí.
- Pro oba sledované materiály byly stanoveny závislosti lomové houževnatosti na délce trhliny, resp. hodnotě parametru Q kvantifikujícího constraint na čele trhliny. V obou případech byla zjištěna silná závislost hodnot lomové houževnatosti na délce trhliny. S klesající délkou trhliny vzrůstá střední hodnota lomové houževnatosti, naměřená při stejné teplotě (určené pro podmínku stejného mechanismu porušení u všech zkušebních těles). Spodní

úroveň hodnot lomové houževnatosti naměřených při stejné teplotě se s délkou trhliny mění nevýrazně.

- Pro oba sledované materiály byl zjištěn posun tranzitní oblasti směrem k nižším teplotám, včetně posunu charakteristických teplot, s klesající délkou trhliny. Současně vzrůstají hodnoty houževnatosti, včetně horní prahové oblasti.
- Fraktografická analýza těles zkoušených při jedné teplotě prokázala stejný mechanismus porušení (dominantní zastoupení štěpného lomu) u obou typů materiálu. Nebyly zjištěny kvalitativní změny mechanismu nukleace štěpného lomu a iniciace křehkého porušení v závislosti na délce trhliny.
- Pro oba typy zkoumaných materiálů byla stanovena hodnota kritického lomového napětí jako hlavní charakteristika kontrolující lokálně iniciaci křehkého lomu. U duplexní oceli (pro délky trhliny a/W do 0.2) nebyla zjištěna závislost tohoto napětí na délce trhliny. U C-Mn oceli toto napětí s klesající délkou trhliny nejprve vzrůstá (do a/W 0.2) poté klesá (pro a/W 0.1 až 0.2).
- Pro **SENB** tělesa s krátkou trhlinou (a/W 0.2 až 0.1) byl zjištěn odlišný vývoj napětově deformačního stavu pod čelem trhliny v porovnání s tělesy s poměrem a/W 0.2 až 0.5. U těchto těles dochází již v ranných stádiích zatěžování k vyústění plastické deformace na volný povrch ze strany vrubu. Největší hlavní napětí působící v blízkosti volného povrchu překonává v tomto okamžiku mez kluzu. Na čele trhliny tak díky tomuto jevu dochází k relaxaci největšího hlavního napětí (v porovnání s větší délkou trhliny při stejné úrovni zatížení) a k lomu při nižší hodnotě lokálního (lomového) napětí.
- Pro duplexní ocel byla ověřena vhodnost použití predikce **J-Q** závislosti založená na **RKR** modelu porušení s předpokladem, že kritické lomové napětí se s délkou trhliny nemění. Stejný model se pro C-Mn ocel ukázal jako neplatný (z důvodu výše uvedené změny kritického lomového napětí s délkou trhliny).

7 LITERATURA

- Anderson, T.L.: "Fracture mechanics", CRC press, 1995.
- Begley, J.A., Landes, J.D., "The J Integral as Fracture Criterion" Fracture Toughness, Proc. of the 1971 National Symposium on Fracture Mechanics, Part II, ASTM STP 514, 1972, pp.1-20.
- Dlouhý, I., Procházková, A., Kozák, V., Holzmann, M.: "Characteristics of fracture behaviour of duplex steels in transition region", Conf. proc.:ECF 11, 1996, pp. 651-656.
- Dlouhý, I.: "Ekvivalence účinků teplotního stárnutí a nízkoteplotního zkřehnutí u duplexních ocelí", Conf. proc.: Dny tepelného zpracování 96, 1996.
- Eshelby, J.D.: "The continuum theory of lattice defects", Solid State Physics, Vol. 3, 1956.
- Irwin, G.R.: "Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate", Journal of Applied Mechanics, Vol. 24, 1957, pp. 361-364.
- Joly, P., Pineau, A.: "Modelling of the effect of thermal aging of duplex stainless steels on their fracture toughness", Scandinavian Journal of Metallurgy, 1995, Vol. 24, pp. 226-236.
- Knésl, Z., Bednář, Z.: "Dvoupárametrová lomová mechanika, výpočet parametrů a jejich hodnoty", 1997.
- Koledník, O. et al. : "The fracture resistance of a ferritic-austenitic duplex steel", Acta Metall., 1996, Vol. 44, pp. 3307-3319.
- Kozák, V., Nепublikované výsledky, 1998-2001.
- Landes, J.D.: "The effect of constraint on fracture safe design", Conf. proc.: ECF 10 Structural Integrity: experiments, models and applications, 1994, pp. 23-35.
- Marrow, T.J., Harris, C.: "The fracture mechanism of 475°C embrittlement in a duplex stainless steel", Fatigue Fract.Engng.Mater.Struct., 1996, Vol. 19, pp. 935-947.
- Marrow, T.J., Bury, N.: "The brittle fracture of 475°C embrittled cast duplex stainless steel", Fatigue Fract.Engng.Mater.Struct., 1997, Vol. 20, pp. 565-571.
- Novák, A., Disertační práce, Brno, 2001.
- Novák, A., Nепublikované výsledky, 1998-2000.
- O'Dowd, N.P., Shih, C.F.: "Two-parameter fracture mechanics: theory and Applications", Fracture Mechanics, Philadelphia, 1994, Vol. 24, pp. 21-47.
- Rice, J.R.: "A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks", Journal of Applied Mechanics, Vol. 35, 1968, pp. 379-386.
- Ruggieri, C., Dodds, R.H.: "A transferability model for brittle fracture including constraint and ductile tearing effects: a probabilistic approach", Int. Journal of Fracture, Vol. 79, 1996, pp. 309-340.
- Shih, C.F., O'Dowd, N.P.: "A fracture mechanics approach based on a toughness locus", Conf. proc.: International conference on shallow crack fracture tests and applications, 1992, paper 31.
- Shih, C.F., O'Dowd, N.P., Kirk, M.T.: "A framework for quantifying crack tip constraint", ASTM STP 1171 Constraint effect in fracture, Philadelphia, 1993, pp. 2-20.
- Vlček, L.: Nепublikované výsledky, 2000-2001.
- Vlček, L., Kozák, V.: "Numerické a experimentální určení lomových charakteristik tělesa s trhlinou", Conf. proc.:Problémy lomové mechaniky, Brno, 2001, pp. 84-92.
- Wallin, K.: "Statistical aspects of constraint with emphasis on testing and analysis of laboratory

specimens in the transition region", ASTM STP 1171 Constraint effect in fracture, Philadelphia, 1993, pp. 264-288.

Wels, A.A.: "Application of fracture mechanics and beyond general yielding", British Welding Journal, Vol. 10, 1963, pp. 563-570.

Wiesner, C.S., Andrews, R.M.: "A review of micromechanical failure models for cleavage and ductile fracture", TWI, Cambridge, 1997.

Williams, M.L.: "On the stress distribution at the base of a stationary crack", Journal of Applied Mechanics, 1957, pp. 109-114.

Poděkování:

Práce vznikala za finanční podpory projektu č.972655 NATO Science for Peace a projektu č. 101/96/K264 Grantové agentury ČR.

Vlastní publikace autora vztahující se k řešenému tématu

Z. Chlup, I. Dlouhý, V. Kozák: Crack length effect on fracture behaviour of duplex steels, Conference Svatka 1997, Zeszyty naukowe politechniki opolskiej, Seria Mechanika z. 55, Nr. Kol. 235/1997, pp. 27-35.

I. Dlouhý, Z. Chlup, M. Holzmann: Crack length effect on fracture behaviour of duplex steels, Int. Conf. FRACTOGRAPHY '97, Stará Lesná, October 26-29, 1997, pp. 474-482.

Z. Chlup, I. Dlouhý: The effect of crack length and loading rate on fracture behaviour of cast iron, Junior-Euromat 98, Laussane, September 1998.

Z. Chlup, I. Dlouhý, M. Holzmann: Brittle fracture initiation and crack-length effect. MSMF2, Metalic. Mater. 36, 1998, No. 3-S, pp. 68-73

I. Dlouhý, Z. Chlup, M. Holzmann: Crack length effect on fracture behaviour of duplex steels, Proc. of 12th European Conference on Fracture, Vol. 2, Sheffield, 1998, pp. 727-732

Z. Chlup, I. Dlouhý, M. Holzmann: Mikromechanistické aspekty účinku constraint u duplexních ocelí, Seminář "Křehký lom", Brno 1998, pp. 25-32

Z. Chlup, I. Dlouhý, M. Holzmann: Mikromechanistické aspekty a metody hodnocení constraint účinku, Int. Conf. Inženýrská mechanika 99, Svatka, Vol. 2, pp.315-320.

Z. Chlup, M. Holzmann, I. Dlouhý: Hodnocení vlivu triaxiality na špici trhliny na lomové chování Mn lité oceli, Materiálové vědy na prahu 3. milénia, Brno, 1999, pp. 330-331.

I. Dlouhý, Z. Chlup: Vlastnosti oceli tlustostěnného odlitku normalizované z interkritické oblasti, 18. dny tepelného zpracování s mezinárodní účastí, Brno, 2000, pp. 11-19.

I. Dlouhý, Z. Chlup: Micromechanical Aspects of constraint effect in steel for containers of spent nuclear fuel, ECF 13 Fracture mechanics: Applications and Challenges, San Sebastián, 2000, na CD.

I. Dlouhý, Z. Chlup, M. Holzmann: Local Characteristics of (Brittle) Failure Assessed from Charpy Type Specimen, Advanced Research Workshop „notch Effects in Fatigue and Fracture“, Durres, 2000, pp. 127-146.

Z. Chlup, I. Dlouhý: Two-parameter approach to fracture resistance assessment of steel for spent fuel casks, Junior Euromat 2000, Lausanne, pp. 538-539.

Z. Chlup, I. Dlouhý: Mikromechanické aspekty vlivu délky trhliny na lomovou houževnatost a tranzitní chování oceli, Seminář: Problémy lomové mechaniky, Brno, 2001, pp. 48-59.

I. Dlouhý, Z. Chlup, V. Kozák: Constraint effects at Brittle Fracture Initiation in Cast Ferritic Steel, Fracture and Damage Mechanics, Miláno, 2001, připravuje se.

I. Dlouhý, Z. Chlup, V. Kozák, M. Holzmann: Fracture Toughness Transferability – from Small to Full Scale Specimens, Charpy Centenary Conference, Poitiers, 2001, připravuje se.

RESUME

Micromechanics aspects of brittle fracture initiation

Recent knowledge about crack tip constraint phenomena and development of constraint indexing parameters (T-stress, Q-parameter) seems to be one of way how fracture toughness temperature diagram to predict.

Arising from two-parameter fracture mechanical approach to the analysis of failure initiation condition three point bend specimens with shallow and deep cracks were tested at various temperatures. Two materials with specific behaviour have been used for investigation. Duplex stainless steel of the type SAF 2205 has been used for analysis having model microstructure after ageing at 475°C. The second one - low carbon manganese cast steel was used for analysis being tested as one of materials for containers of spent nuclear fuel. The effect of crack length on fracture toughness temperature diagram has been analysed. Fractographic observations, FEM calculations and other methods completed the complex analyses of fracture behaviour.

Although strong dependence of measured fracture toughness on crack tip constraint was observed no evident differences in fracture morphology have been identified except for quantitative ones. Peculiarities of fracture behaviour in transition and lower shelf region steel investigated have been explained. The effect of crack tip constraint on brittle fracture characteristics has been quantified by means of Q-parameter. Fracture toughness locus (J-Q dependence) predicted with assumption of stress controlled fracture was compared with experimentally determined data.

The importance of constraint phenomena assessment for evaluation of material fracture resistance in transition region will be underlined. The role of critical (cleavage) fracture stress in brittle fracture initiation under the influence of crack tip constraint was analysed.

CURRICULUM VITAE

Ing. Zdeněk Chlup

Rodinný stav: ženatý

Národnost: česká

Datum narození: 21.3.1973

Místo narození: Olomouc

Základní vzdělání: 1979 - 1988

Základní škola: ZŠ Čajkovského, Olomouc

Středoškolské vzdělání: 1988 - 1991

Střední průmyslová škola strojnická: Tř. 17. Listopadu, Olomouc

Obor: Strojírenská technologie

Středoškolské vzdělání ukončeno maturitní zkouškou s vyznamenáním.

Vysokoškolské vzdělání: 1991 - 1996

VUT fakulta strojní: Technická 2, Brno

Obor: Materiálové inženýrství

Téma diplomové práce:

Tepelné zpracování a vlastnosti tvárné litiny s dvoufázovou strukturou matrice

Vysokoškolské vzdělání ukončeno státní zkouškou s vyznamenáním

Postgraduální studium: 1996 - 1999

VUT fakulta strojní: *Technická 2, Brno*

Školící pracoviště: ÚFM AV ČR, Žižkova 22, Brno

Téma disertační práce:

Mikromechanistické aspekty iniciace křehkého lomu

Složena státní doktorská zkouška 1999

Zaměstnání: Odborný pracovník, *ÚFM AV ČR, Žižkova 22, Brno* 1999 - 2001

O d b o r n á p r a x e

Postgraduální studium na ÚFM AV ČR Brno 1996 - 1999

Odborný pracovník na ÚFM AV ČR Brno 1999 - 2001

O d b o r n é z n a l o s t i

Mechanické zkoušky, metalografie, fraktografie, statistika, tepelné zpracování, defektoskopie, akustická emise.