

CAUSES OF ARISING INHERENT DEFECTS AS NUCLEI OF BRITTLE FRACTURE

K. Polák¹, J. Bošanský²

Summary: *The occurrence of deformation twins in the ductile-to-brittle transition (DBT) temperature region were observed under different testing conditions. Mechanical twinning could play a significant role in the DBT of polycrystalline ferritic structural steels. Frequent presence of nuclei of pre-cleavage microcracks (PCMC) which presumably related to deformation twins was revealed in close vicinity of cleavage facets or cleavage part of fractured surfaces. It was assumed that deformation twinning represent an integral part of deformation processes in the region of propagating cleavage crack tip and the deformation twins which nucleate in front of the crack tip act as nucleation areas for cleavage fracture nuclei. The assumed (re) initiation of cleavage fracture on deformation twins nucleating in front of propagating cleavage crack tip eliminates the contradiction between the results of recent brittle/cleavage fracture theory and the results of experiments.*

1. Úvod

Je všeobecne známe, že s klesajúcou teplotou pri daných podmienkach deformácie v α - Fe a v oceliach s kubickou priestorovo centrovanou mriežkou sa lom mení z tvárneho na štiepny. Táto zmena sa odohráva v teplotnom intervale ozn. ako prechodové teploty. Prechodová teplota, pri ktorej sa zistí 50% štiepneho lomu sa nazýva tranzitnou. Existujú aj iné definície tranzitnej teploty.

Jedným z problémov súčasného chápania štiepneho porušenia je otázka, či lomové napätie je potrebné na šírenie existujúcich trhlín ako predpokladá Griffith, alebo je potrebné na ich iniciáciu. To znamená, či štiepny lom je riadený nukleáciou alebo jeho rastom. O mikromechanizme štiepneho porušenia podrobne pojednáva práca [1]. Podľa prepočtov experimentálne nameraných napätí by mali v oceliach existovať inherentné zárodoky štiepných trhlín s dĺžkou rádovo niekoľkých μm , čo je minimálne pre čisto feritickú maticu nepravdepodobné. Hlavne ak obsah uhlíka je nízky a štruktúra je čisto feritická.

V prácach [2,3] sme ukázali, že deformačné dvojčatenie má väčší vplyv na tranzitnú teplotu b.c.c ocelí ako sa doteraz predpokladalo. Na lomových plochách sa preukázala reiniciácia štiepneho porušenia na hraniciach deformačných dvojčiat. V analyzovaných vzorkách sa nezistil štiepny lom bez súčasného výskytu deformačných dvojčiat. Usúdilo sa, že existencia tranzitnej teploty priamo súvisí so zmenou deformácie sklzom na kombinovaný mechanizmus

¹ Pof.Ing.Karol Polák, Dr.Sc, Materiálovo technologická fakulta, STU Trnava

² Prof.Ing.Ján Bošanský, Ph.D., IBOK, a.s., Bratislava, Pionierska 15

sklzu a dvojčatenia. V experimentálnej časti sa uvádzajú pozorovania, podľa ktorých deformačné dvojčatá sa tvoria pred čelom rastúcej štiepnej trhliny a po prasknutí pôsobia ako inherentné defekty.

2. Experimentálna časť

Metodika skúšok

Experimentálna časť sa zamerala na analýzu lomových plôch, dvojčiat a mikrotrhlín v okolí štiepných faziet viacerých feritických ocelí:

- 1) BEHANIT (technicky čisté železo)
- 2) Feriticko-perlitická oceľ E – 380
- 3) Termomechanicky spracovaná oceľ E - 700 TS
- 4) Teplom ovplyvnená oblasť zvarového spoja ocele E – 700 TS

Lomové plochy a ich okolie sa pozorovalo na skúšobných telieskach po rázovej skúške ohybom, ťahovej skúške pri rôznych rýchlostiach a po skúške lomovej húževnatosti trojbodovým ohybom. Priečne metalografické výbrusy sa skúmali bez leptania ako aj po leptaní svetelným a rastrovacím elektrónovým mikroskopom.

Výsledky skúšok

Pozorovania vyleštených ťahových teliesok ukázali, že deformačné dvojčatá môžeme v zásade rozdeliť do dvoch skupín. Jednu zo skupín tvoria tak kryštalicky orientované dvojčatá, ktoré sú prakticky pre dislokácie nepriechodné a na ich hraniciach vznikajú mikrotrhliny ako vidno z obr.1. Druhú skupinu tvoria dvojčatá s takou orientáciou vzhľadom k sklzovým systémom, že dislokácie (sklzoové pásy) cez dvojčatá prechádzajú (obr.2).

K rovnakým záverom sa dospelo aj pozorovaním lomových plôch. Skúmanie lomových plôch ukázalo, že niektoré dvojčatá môžu slúžiť ako iniciačné resp. reiniciačné zárodky štiepných faziet. Takéto miesto charakterizuje obr.3, kde riečky štiepnej fazety vychádzali z hranice dvojčatá. Na obr.4 vidno, že riečky štiepnej fazety dvojčatom prechádzajú, z čoho možno usudzovať, že v tomto prípade deformačné dvojčata nebolo významnou prekážkou pre pohybujúce sa dislokácie.

Okrem toho sa pozorovaním lomových plôch a priečných rezov zistilo, že vždy v prítomnosti štiepných faziet sa vyskytovali aj deformačné dvojčatá. Deformačné dvojčatá sa pozorovali na vrubovom teliesku α - Fe už pri teplote skúšania $+20^{\circ}\text{C}$, zatiaľ čo sa nepozorovali v oceli E – 700 TS ani po skúške ťahom (1ms^{-1}) pri teplote skúšania -196°C .

Na základe týchto pozorovaní sme prišli k záveru, že deformačné dvojčatenie hrá v oblasti prechodových teplôt dôležitejšiu úlohu ako sa doteraz predpokladalo. To znamená, že v oblasti tranzitných teplôt prechádza mechanizmus sklzu na mechanizmus sklzu s deformačným dvojčatením. Tieto výsledky sme publikovali v prácach [2,3].

Na rezoch kolmých k lomovým plochám po rôznych skúškach sme pozorovali početné mikrotrhliny. Tieto trhliny sa výlučne vyskytovali pri štiepných fazetách. Príklad nenaleptaného rezu v blízkosti lomovej plochy BEHANITU je na obr.5. Je nepravdepodobné, aby mik-

rotrhliny boli v tejto vzdialenosti ako vybočenie magistrálnej trhliny. Mikrotrhliny boli relatívne úzke v rozmedzí 1-2 μm . Podobné mikrotrhliny sa pozorovali v okolí štiepných lomových plôch vo všetkých skúmaných oceliach. Napr. na obr.6 sú mikrotrhliny v okolí magistrálnej lomovej plochy ocele E – 700 TS. Tieto trhliny sú však rozovretejšie so šírkou 3 – 3,5 μm , čo mohla spôsobiť vyššia medza sklzu materiálu E – 700 TS.

BEHANIT

Z metodických dôvodov sa charakter PCMC najprv analyzoval na vzorkách BEHANITU. Intenzívne dvojčatenie sa pozorovalo už v okolí lomovej plochy telieska skúšaného na vrubovú húževnatosť pri $+20^{\circ}\text{C}$ ako vidno z obr.7. Z obr.8 vyplýva, že PCMC má orientáciu zhodnú s deformačnými dvojčatami. Totožnosť PCMC s prasknutým dvojčatom možno vidieť z obr.9, podľa ktorého mikrotrhlinu možno považovať za štiepnu. Rozdielnosť porušovania hranice dvojčata a hranice zrna s veľkým uhlom vidieť z porovnania obr.10 s obr.11. Na obr.10 je vidieť klinovité zárodky štiepných trhliniek na hranici dvojčata, zatiaľ čo na obr.11 je vidieť reťazce jamiek tvárneho porušovania z oboch strán hranice zrna. Okrem toho na obr. 11 možno vidieť mikrotrhliny v perlite a štiepne prasknuté dvojča (PCMC).

Ocele E – 380 a E – 700 TS

Z pozorovaní možno konštatovať, že distribúcia a charakter PCMC v okolí lomových plôch konštrukčných ocelí E – 380, E – 700 TS a TOO zvarového spoja ocele E – 700 TS bola podobná ako v BEHANITE. V okolí štiepných lomových plôch sa zistili početné PCMC, ktoré sa vyskytovali v tesnej blízkosti lomových plôch. Ak sa vzorka porušila zmiešaným štiepným a tvárnym lomom, PCMC sa zistili len v okolí štiepnej časti lomovej plochy. PCMC často v rámci jedného zrna vytvárali paralelné dvojice resp. trojice podobné dvojčatám v BEHANITE. Príklad trhlín v oceli E – 700 TS je na obr.12. Celkový charakter trhlín pri menšom zväčšení vidno z obr.13. Miesto označené na obr.13 rámečkom pri väčšom zväčšení je na obr.14. Ako vidno z obrázku menší z defektov je pravdepodobne dvojča.

Oceľ K 22

Podľa predchádzajúcich výsledkov sa predpokladalo, že PCMC sa musia vyskytovať v okolí všetkých štiepných lomových plôch konštrukčných ocelí. Náhodne sa vybrala vzorka ocele K 22 po skúške statickej lomovej húževnatosti trojbodovým ohybom pri teplote -60°C . Takáto skúška sa najviac približuje prevádzkovým podmienkam a simuluje nestabilný rast trhliny resp. iniciáciu krehkého porušenia. Príklad okolia štiepnej lomovej plochy feriticko-perlitickej ocele K 22 je na obr.15. Na obrázku sú PCMC s rôznymi orientáciami. Jedna z PCMC je paralelná s dvojčatom a sú označené. Skutočnosť, že štiepne PCMC sledujú hranicu deformačného dvojčata je možné dokumentovať obr.16. V dolnej časti obrázku je porušené len čiastočne.

Jednou z často pozorovaných vlastností PCMC vo všetkých analyzovaných materiáloch bolo „vybočenie“ mikrotrhliny do neďalekej paralelnej roviny. Príkladom je obr.17 a dôkazom, že sa jedná o dvojčatá je obr.18, kde dvojčatá majú podobné zoskupenie.

Deformačné dvojčatá zasahovali aj do perlitických zŕn a to buď po okraji alebo aj do celého objemu eutektoidu. Príklad takého prechodu dvojčata perlitom je na obr.19 a 20.

Štiepne fazety vytvorené na troch paralelných dvojčatách možno vidieť aj na lomovej ploche obr.21. Štiepne fazety sú v tomto prípade spojené tvárnymi mostíkmi.

Experimentálne bude pravdepodobne obtiažne zastaviť štiepnu trhlinu tak, aby sa mohlo preskúmať jej čelo. Ako analogický model môže poslúžiť čelo sekundárnej trhliny ako dokumentuje obr.22. Z obrázku vidno, že pred čelom trhliny sa nachádzajú tak PCMC ako aj neporušené dvojčatá.

3. Diskusia

Príspevok vychádza z prác [2,3], v ktorých sme ukázali na bezprostredný súvis deformačného dvojčatenia s existenciou tranzitnej teploty feritických konštrukčných ocelí. Ukázal sa jednoznačný vzťah medzi deformačným dvojčatením a štiepnym mechanizmom lomu. Mikrofraktografickou analýzou sa dokázala reiniciácia štiepneho porušenia na hranici deformačných dvojčiat.

V nadväzných prácach podrobnou analýzou lomových plôch skúšobných teliesok na metalografických výbrusoch kolmých k lomovým plochám sa v blízkosti lomovej plochy zistili početné PCMC, ktoré priamo súviseli s magistrálnou trhlinou. Tieto trhliny nemohli vzniknúť po prechode magistrálnej trhliny, ale vznikali v napäťovo-deformačnom poli pred koreňom šíriacej sa magistrálnej trhliny.

Podobnosť PCMC v BEHANITE, E – 280 a K 22 s trhlínami vo vysokopevnej oceli E – 700 TS, kde sa existencia dvojčiat dokázala len na lomových plochách predpokladáme, že i v tejto oceli PCMC nukleujú na dvojčatách.

Všetky výsledky, ktoré sme v tejto oblasti urobili naznačujú, že inherentné zárodky štiepneho porušenia v konštrukčných oceliach s dĺžkou niekoľkých mikrometrov napr. i v práci [1], môžu vzniknúť na hraniciach deformačných dvojčiat generovaných napäťovo-deformačným poľom čela blížiacej sa trhliny.

Už Smallman vo svojej súbornej práci [4] uvádza, že na iniciáciu dvojčiat je potrebné vyššie napätie ako na ich rast a toto napätie je zvyčajne vyššie ako sklzové napätie pri +20°C. Deformačné dvojčatá sa objavujú náhle a ich vznik je často sprevádzaný akustickou vlnou. Ďalej uvádza, že sklzové napätie matricových dislokácií je priamo úmerné veľkosti ich Burgersovho vektora. Keďže veľkosť dvojčatovej parciálnej dislokácie $a/6 \langle 111 \rangle$ je 1/3 sklzovej dislokácie, pravdepodobne aj energia jej šírenia sa zníži v podobnom pomere.

Vysoká rýchlosť deformačného dvojčatenia je nutným predpokladom aby sa mohlo zúčastňovať štiepneho, resp. krehkého porušovania feritických materiálov. Krehký lom z makroskopického hľadiska sa chová podobne ako dvojčatenie z pohľadu mikroskopického. Na iniciáciu krehkého lomu je potrebné dosiahnuť kritické napätie pre danú (kritickú) veľkosť trhliny. Po dosiahnutí kritického napätia sa lom šíri spontánne vysokou rýchlosťou. Ak má byť deformačné dvojčatenie kooperujúcim procesom pri krehkom (štiepnom) lome, musia aj deformačné dvojčatá pred čelom šíriacej sa trhlíny vzniknúť v predstihu. Z toho vyplýva, že deformačné dvojčatenie sa významným podielom zúčastňuje aj krehkého lomu reálnych oceľových konštrukcií.

4. Predpokladaný mechanizmus štiepneho / krehkého lomu

V prvých fázach plastickej deformácie vznikajú deformačné dvojčatá v optimálnych kryštalografických smeroch vzhľadom k nominálnemu zaťaženiu materiálu. Tieto dvojčatá možno

považovať za primárne a vplyvom nasledujúcej plastickej deformácie nemusia na nich vzniknúť PCMC. Čelo blížiacej sa štiepnej trhliny mení charakter napäťovo-deformačného poľa a zvyšuje sa hustota dislokácií v okolí čela trhliny a vznikajú nové (sekundárne) dvojčatá vhodnejšie orientované k magistrálnej trhline. Prechádzajúce čelo trhliny ich potom spája buď štiepnymi fazetami, ktoré môžu iniciovať aj na hranici s veľkým uhlom a vzniká kompletný štiepny lom, alebo je medzi štiepnymi fazetami dostatok zásoby plasticity a premostenie štiepných faziet je tvárne. V druhom prípade vzniká zmiešaný lom štiepno tvárny.

Štiepne porušenie je v takomto prípade výsledkom kooperujúcich procesov deformácie dvojčatením a deformácie sklzom dislokácii pred čelom rastúcej trhliny, pri ktorom by napäťovo-deformačné pole rastúcej trhliny v závislosti od podmienok namáhania premostovalo oblasti medzi štiepnymi zárodkami štiepnym alebo tvárnym mechanizmom. Takýto predpoklad je v plnom súlade s výsledkami numerickej simulácie štiepneho porušenia v prácach [5, 6] a vysvetľuje i pôvod predpokladaných inherentných zárodokov štiepneho porušenia s dĺžkou niekoľkých mikrometrov vo feritických oceliach, ktoré doteraz neboli v neporušených vzorkách pozorované.

5. Záver

Na základe podrobnej metalografickej a mikrofraktografickej analýzy sa ukázalo, že dvojčatenie ako mechanizmus plastickej deformácie má podstatne väčší vplyv na tranzitnú teplotu ako sa predpokladalo. Tranzitná teplota spočíva v tom, že mechanizmus plastickej deformácie sklzom sa postupne mení na mechanizmus sklzom a dvojčatenia.

Na základe existencie PCMC v blízkosti štiepných lomových plôch feritických ocelí a ich súvisu s deformačnými dvojčatami sa vyslovil predpoklad, že deformačné dvojčatenie môže byť integrálnou súčasťou deformačných procesov v oblasti pohybujúceho sa čela štiepnej trhliny pri krehkom lome. Deformačné dvojčatá, ktoré vznikajú pred čelom trhliny môžu pôsobiť ako nukleačné zárodky štiepných faziet. Ich rozmery zodpovedajú rozmerom inherentných zárodokov predpokladaných na základe súčasnej teórie krehkého / štiepneho porušenia, ktoré sa doposiaľ experimentálne vo feritických materiáloch nepozorovali. Vznik PCMC na dvojčatách odstraňuje rozpor medzi výsledkami súčasnej teórie krehkého / štiepneho porušenia a výsledkami experimentov.

6. Literatúra

- [1] Thompson, A. W. – Knott, J. F.: Metall. Trans. A, 241, (1993), 523.
- [2] Šmida, T. – Bošanský, J.: Mat. Sci. Eng. A, 287/1, (2000), 107.
- [3] Bošanský, J. – Šmida, T.: Kovové materiály 38 (2000) 400.
- [4] Smallman, R. E.: Moderní nauka o kovech, SNTL, 1964.
- [5] Machová, A. – Ackland, G. J.: Modelling Simul. Mater. Sci. Eng., 6, (1998), 521.
- [6] Machová, A. – Beltz, G. E. – Chang, M.: Modelling Simul. Mater. Sci. Eng., 7 (1999), 949.