# VPLYV RÝCHLOSTI DEFORMÁCIE NA NEHOMOGENITU PLASTICKEJ DEFORMÁCIE MIKROLEGOVANÝCH OCELÍ URČENÝCH PRE TVÁRNENIE ZA STUDENA

*Čižmárová E., Micheľ J.*
*Katedra náuky o materiáloch, Hutnícka fakulta, Technická univerzita Košice, Slovensko*

# INFLUENCE OF STRAIN RATE ON PLASTIC DEFORMATION HETEROGENEITY OF MICROALLOYED STEEL FOR COLD FORMING

*Čižmárová E., Micheľ J.*
*Department of materials science, Faculty of Metallurgy, Technical University Košice, Slovakia*

**Abstract**

The paper analyses the effect of strain rate on plastic deformation heterogeneity of the two microalloyed steels S 315 MC and S 460 MC, pre-determined for cold work, subjected to uniaxial loading. The plastic deformation development has been analysed on the specimen surface with respect to macro and micro searching considering different sealing area of analysis. The two strain rates of $\dot{\varepsilon} = 10^{-4}s^{-1}$ and $\dot{\varepsilon} = 10^{2}\ s^{-1}$ respectively, representing static and dynamic loading which have been applied. The mean range of deformation 5 to 35% of ran corresponding to each individual deformation step resulted in distance graduation change. To evaluate the heterogeneity of plastic deformation the values L and $M = \frac{\sum_i^n U_x m_x}{n}$ were used.

The results confirm that deformation heterogeneity distribution increases with increasing value of the mean deformation applied, as for macro and as for micro view. In conformity with references the plastic deformation heterogeneity decreased as grain size was finer. The average ferrite grain size of experimental steels is finer (~0.009mm and 0.006mm respectively) than for carbon steels used for cold deformation and demonstrate (exhibit) expressively lower plastic deformation heterogeneity. The applied strain rate showed practically no influence on deformation heterogeneity for tested steels. Considering a general trend in order to increase productivity rate simply only by forming rate increasing this fact should be considered of great importance.

**Key words:** microalloyed steel, deformation rate, heterogeneity of plastic deformation

**Abstrakt**

Príspevok analyzuje vplyv rýchlosti deformácie na homogenitu plastickej deformácie pri jednoosom namáhaní mikrolegovaných pásových ocelí S 315 MC a S 460 MC určených pre tvárnenie za studena. Plastická deformácia je charakteristická tým, že jej rozvoj je výrazne nehomogénny a stupeň nehomogenity je funkciou vnútornej stavby materiálu a vonkajších faktorov medzi ktoré patrí aj rýchlosť deformácie. Poznanie rozvoja plastickej deformácie pri tvárnení za studena je dôležité pre stanovenie technológie tvárnenia. Nehomogenita plastickej deformácie tvárneného polotovaru, alebo výrobku ovplyvňuje aj jeho výsledné vlastnosti.

Rozvoj plastickej deformácie bol analyzovaný z pohľadu makroskopického na dĺžke tyče 50 mm delenej po 1 mm a z pohľadu mikroskopického na výbruse drieku tyče o rozmere 1 x 0,5 mm delenom po 0,05 mm. Tyče boli staticky (~ $10^{-4}$ $s^{-1}$) a dynamicky (~ $10^{2}$ $s^{-1}$)

plasticky deformované na stredný stupeň 5 až 35% a pri každom strednom stupni deformácie bola vyhodnocovaná deformácia jednotlivých dielikov. Ako kritérium nehomogenity plastickej deformácie bola použitá hodnota L a hodnota $M = \frac{\Sigma_i^n U_x m_x}{n}$. Z analýzy vyplynulo, že so zvyšujúcou sa hodnotou stredného stupňa deformácie rastie nehomogenita rozloženia deformácie a to ako z pohľadu makroskopického tak aj mikroskopického.

V súlade s literárnymi poznatkami nehomogenita plastickej deformácie sa znižovala so zjemňovaním zrna. Skúšané ocele majú veľmi jemné feritické zrno (0,009 resp. 0,006mm) a v porovnaní s klasickými uhlíkovými oceľami určenými pre tvárnenie za studena aj výrazne nižšiu nehomogenitu plastickej deformácie. Rýchlosť deformácie v rozmedzí $10^{-4}$ až $10^{2}$ $s^{-1}$ prakticky neovplyvnila homogenitu plastickej deformácie skúšaných ocelí, čo považujeme za dôležitý poznatok vzhľadom na všeobecný trend zvyšovania rýchlosti tvárnenia za účelom zvýšenia produkcie.

## 1. Úvod

Charakteristickým znakom plastickej deformácie je jej nehomogenita. Všeobecne možno konštatovať, že kov sa so stúpajúcim vonkajším napätím začína deformovať na miestach, v ktorých sa dosiahne kritické sklzové napätie, ktoré je závislé okrem vnútorných faktorov od orientácie sklzových systémov ku smeru pôsobiaceho napätia [1,2]. Z pohľadu makroskopiského pri jednoosom namáhaní sa nehomogenita prejaví napríklad po dosiahnutí medze sklzu nerovnomerným šírením Lüdersovho frontu [2,3] a pri strate plastickej stability tvorbou krčku. Z pohľadu mikroobjemu dochádza ku mikronehomogenite deformácie, ktorá sa prejavuje sklzovými pásmi, ktoré sa striedajú s mikrooblasťami relatívne málo resp. vôbec nedeformovanými [1,3,4]. Mikoronehomogenitu deformácie ovplyvňuje štruktúra materiálu. Výrazný vplyv na mikronehomogenitu deformácie má najmä veľkosť zrna, hranice zrna, morfológia a kvalita zastúpených fáz s rôznou deformačnou schopnosťou, vnútorné pnutia a pod.. Nehomogenitu plastickej deformácie výrazne ovplyvňujú aj vonkajšie faktory a to predovšetkým stav napätosti v makroobjeme, ale aj teplota a rýchlosť deformácie [3,5], ktoré za určitých podmienok vedú ku lokalizácii plastickej deformácie. Intenzita vplyvu vonkajších faktorov na nehomogenitu deformácie je funkciou štruktúrnej stavby. Všeobecne možno konštatovať, že so stupňom plastickej deformácie rastie jej nehomogenita, a tento rast je ovplyvnený vnútornými a vonkajšími faktormi [3,5,6].

Výsledkom za studena tvárneného polotovaru resp. výrobku je vznik štruktúrnych nehomogenít, ktoré ovplyvňujú ich úžitkové vlastnosti. Taktiež tieto nehomogenity môžu spôsobiť problémy pri ďalšom spracovaní polotovarov, ale aj pri exploatácii hotových výrobkov (miestna korózia, vznik zárodkov porušenia a pod.).

Cieľom príspevku je posúdiť nehomogenitu plastickej deformácie mikrolegovaných ocelí akosti S-MC určených pre tvárnenie, ako aj vplyv rýchlosti deformácie na jej veľkosť. Vzhľadom na skutočnosť, že v praxi sa rýchlosti deformácie zvyšujú (rast produktivity) pokladáme za významne posúdiť či rýchlosť deformácie v rozsahu $10^{-4}$ až $10^{2}s^{-1}$ ovplyvňuje mikronehomogenitu uvedených moderných ocelí určených pre tvárnenie za studena.

## 2. Materiály a použité experimentálne metodiky

Experimenty boli robené na vzorkách z pásových ocelí hrúbky 8mm, valcovaných za tepla, akosti S 315 MC a S 460 MC odobratých vo smere valcovania. Chemické zloženie a základné mechanické vlastnosti uvádzame v tab.1 a tab.2.

Table 1 Chemical composition of tested steel (in weight %)

| Materiál | C | Mn | Si | P | S | Al | Ti | Nb | V |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| KODUR 315 MC | 0,05 | 0,87 | 0,02 | 0,011 | 0,007 | 0,042 | 0,011 | 0,042 | - |
| KODUR 460 MC | 0,07 | 1,53 | 0,02 | 0,011 | 0,004 | 0,05 | 0,015 | 0,051 | 0,082 |

Table 2 Mechanical properties of tested steel

| Materiál | Re [MPa] | Rm [MPa] | $A_5$ [%] | Z [%] | KCV [J.cm$^{-2}$] |
|---|---|---|---|---|---|
| KODUR 315 MC | 390 | 477 | 38 | 80 | 360 |
| KODUR 460 MC | 537 | 625 | 30 | 76 | 207 |

Skúšané ocele majú znížený obsah C, P, S a Si, čo je predpokladom dobrej tvárniteľnosti za studena. Vyznačujú sa aj vysokou odolnosťou proti krehkému a únavovému porušeniu, kvalitným povrchom a výbornou zvárateľnosťou. Vysoká medza sklzu, ako aj ťažnosť a kontrakcia týchto ocelí sú výslednicou ich štruktúry.

Mikroštruktúru skúšaných ocelí dokumentujú obr.1 a obr.2. Štruktúra oboch ocelí je jemnozrná feriticko – perlitická so zníženým obsahom perlitu. Vo feritickej matrici sú rovnomerne rozložené precipitáty mikrolegujúcich prvkov, ako to dokumentujú obr.3 a obr.4. Obsah perlitu (P), ako aj veľkosť zrna (d) a vzdialenosť medzi precipitátmi ($\lambda$) sú uvedené v tab.3.

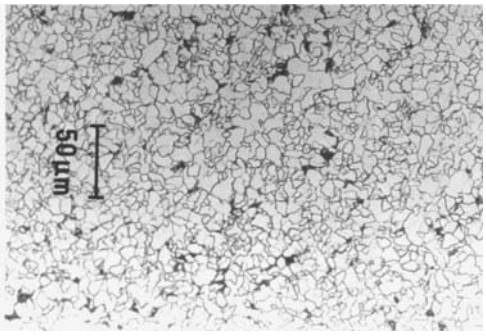


Fig.1 Microstructure of S 315 MC steel

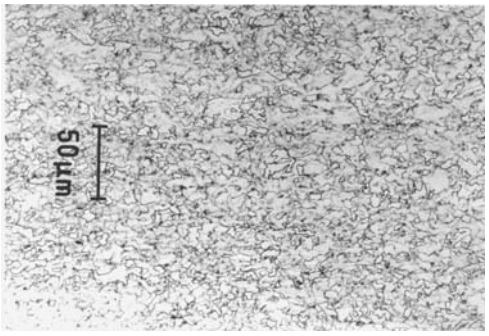


Fig.2 Microstructure of S 460 MC steel

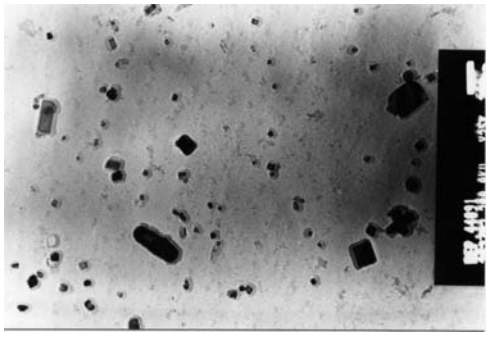

Fig.3 Substructure of S 315 MC steel

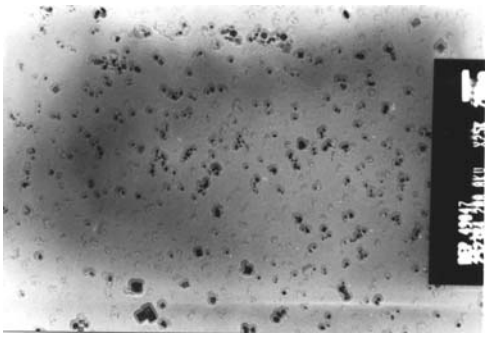

Fig.4 Substructure of S 460 MC steel

Table 3 Microstructural parameters of tested steel

| Oceľ | d [mm] | λ [mm] | P [%] |
|---|---|---|---|
| KODUR 315 MC | 0,009 | $1{,}68.10^{-4}$ | 3 |
| KODUR 460 MC | 0,006 | $0{,}81.10^{-4}$ | 1 |

Zo vzoriek boli vyrobené skúšobné tyče o prierez $d_0$ = 5,5 mm. Pracovná dĺžka $L_0$ bola rozdelená na cca 50 dielikov po 1mm a jednotlivé vzdialenosti medzi dielikmi zmerané na digitálnom mikroskope. Tyče boli ťahom staticky zaťažované na trhacom stroji INSTRON 1185 pri rýchlosti deformácie $3{,}32.10^{-4}s^{-1}$ a dynamicky na Charpyho kyvadlovom kladive pri rýchlosti deformácie $10^2s^{-1}$ na požadovaný stupeň celkovej plastickej deformácie (cca 5 - 35%). Po každom zaťažení boli opäť zmerané vzdialenosti medzi jednotlivými dielikmi.

Podobne bolo sledované aj rozloženie deformácie v mikroobjemoch skúšobnej tyče. Na drieku tyčí boli vybrúsené, vyleštené a naleptané plochy, na ktorých boli nanesené mikro sieťky pomocou mikrotvrdomeru o rozmere oka (štvorca) 0,05 x 0,05 mm (viď. obr.5). Mikrosietka bola snímaná na mikroskope NEOPHOT 32 pomocou Polaroid Digital Microscope Camera. Podobne ako u makrorozloženia deformácie boli skúšobné tyče deformované na požadovaný stupeň plastickej deformácie (5 – 35 %) staticky na trhacom stroji INSTRON 1185 pri rýchlosti deformácie $3{,}32.10^{-4}s^{-1}$ a dynamicky na Charpyho kyvadlovom kladive pomocou prípravku pri rýchlosti deformácie $1.10^2s^{-1}$.

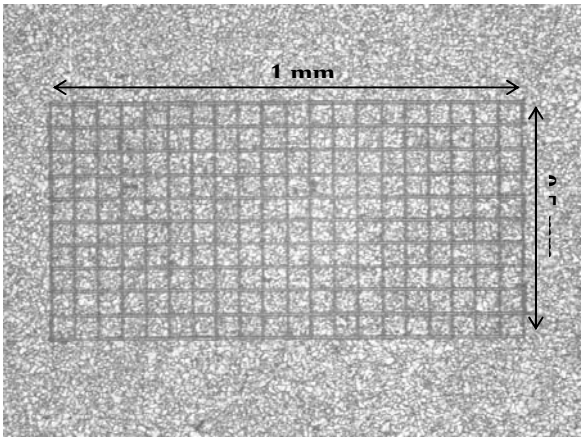


Fig.5 Microgrid S 315 MC steel before deformation

## 3. Analýza výsledkov

Vplyv rýchlosti deformácie na rozvoj plastickej deformácie pri ťahovom namáhaní bol sledovaný z hľadiska makroskopického aj mikroskopického.

Priebeh rozloženia makrodeformácie po dĺžke tyče po statickej ($3{,}32.10^{-4}s^{-1}$) deformácii na rôzny stupeň ocele S 315 MC je graficky znázornený na obr.6 a po dynamickej ($10^2s^{-1}$) deformácii na obr.7. Z uvedených obrázkov vyplýva, že rozloženie deformácie po dĺžke tyče je nerovnomerné. Aby bolo možné stanoviť kritéria, ktoré by kvantitatívne posudzovali nehomogenitu makrodeformácie, boli spracované pri všetkých stredných stupňoch deformácie histogramy v súradniciach interval deformácie (2%) a početnosť dielikov v danom intervale. Na

obr.8 je znázornený takýto histogram rozloženia deformácie ocele S 315 MC pri strednej statickej deformácii 14,77 %.

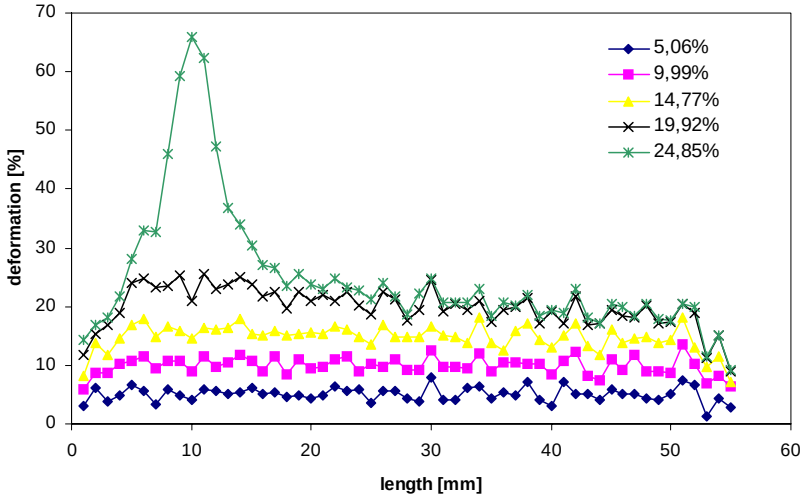


Fig.6 The distribution of deformation on the length of specimen of S 315 MC steel at different strain degree at static loading ($3{,}32.10^{-4}$ $s^{-1}$)

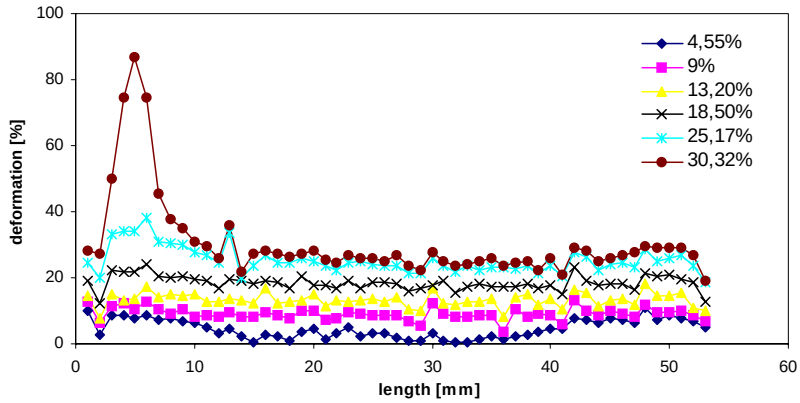


Fig.7 The distribution of deformation on the length of specimen of S 315 MC steel at different strain degree at dynamic loading ($10^2$ $s^{-1}$)

Ako kritéria pre posúdenie nerovnosti deformácie po dĺžke tyče pri jednotlivých stupňoch strednej deformácie ε boli zvolené - priemerná nerovnomernosť M a hodnota variačného rozpätia štatistického súboru L. Hodnota M bola vypočítaná podľa vzťahu

$$M = \frac{\Sigma_i^n U_x m_x}{n} \quad [\%] \qquad (1)$$

kde n je počet prvkov štatistického súboru a ostatné veličiny vyplývajú z obr.8.

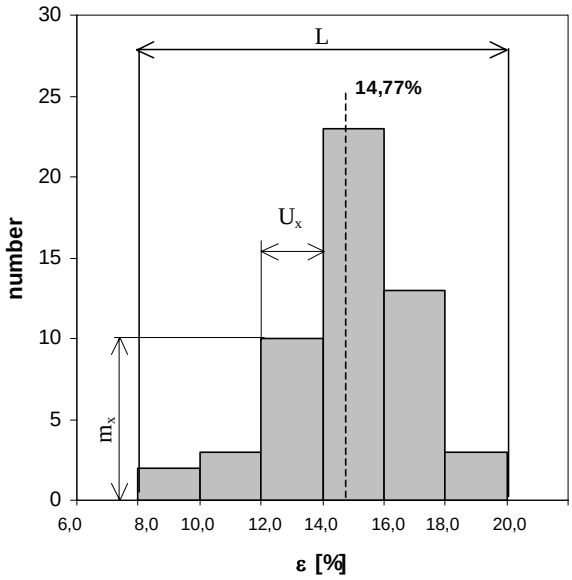


Fig.8 The histogram of deformation distribution at medium deformation ε = 14,77% of S 315 MC steel at static loading

Na obr.9 a obr.10 sú graficky znázornené závislosti kritérií nerovnomernosti rozloženia deformácie M a L od stupňa strednej deformácie pre skúšané ocele. Z rozboru vyplýva, že nerovnomernosť rozloženia deformácie po dĺžke tyče sa zo zvyšovaním stupňa strednej deformácie zvyšuje. V podmienkach rázového zaťažovania je nerovnomernosť rozloženia deformácie po dĺžke tyče pri vyšších stupňoch strednej deformácie nižšia ako pri statickom zaťažení čo je z hľadiska vhodnosti skúšaných ocelí pre tvárnenie za studena dôležitý poznatok.

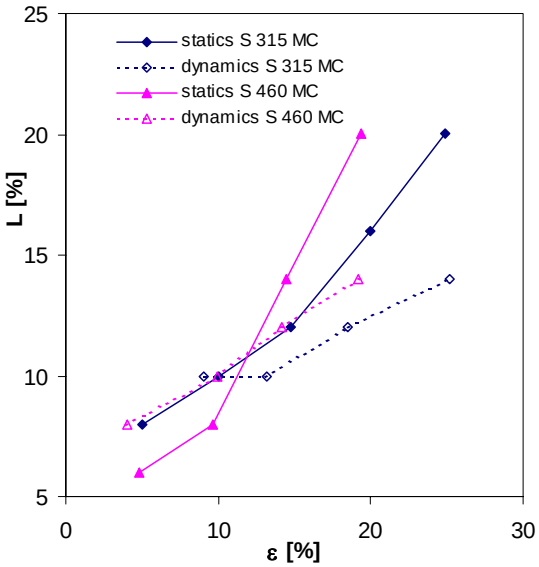


Fig.9 The dependence of variational interval L at medium degree of deformation ε

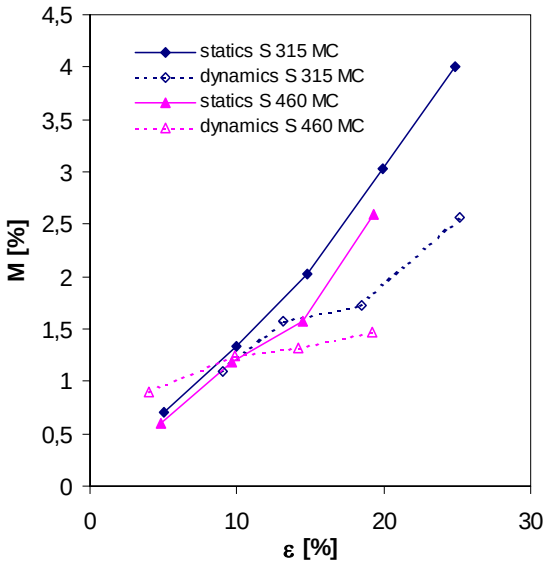


Fig.10 The dependence of heterogeneity of deformation M at medium degree of deformation ε

Pri vyhodnocovaní makronerovnomernosti plastickej deformácie po dĺžke tyče bol zvolený podobný postup ako pri vyhodnocovaní mikronerovnomernosti. Na obr.11 je dokumentovaná mikrosieť ocele S 315 MC po dynamickej plastickej deformácii na stredný stupeň 16%.

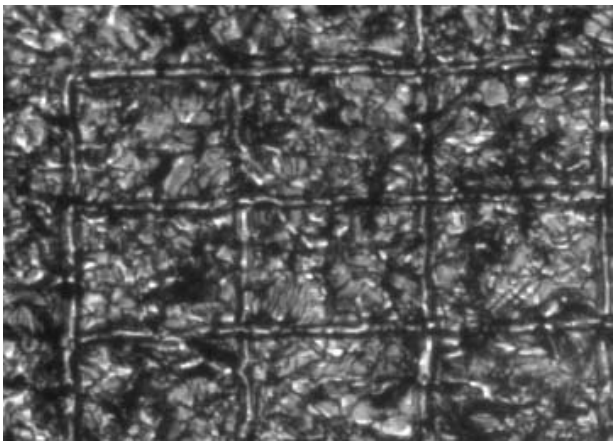

Fig.11 Microgrid after 16% dynamics deformation ($10^2 s^{-1}$)

Závislosti kritérií nerovnomernosti rozloženia deformácie M a L od stupňa strednej deformácie mikrooblasti pre oceľ S 315 MC sú na obr.12 a obr.13. Výsledky potvrdzujú, že rýchlosť deformácie z praktického hľadiska neovplyvňuje mikronerovnomernosť plastickej

deformácie. Kritéria nerovnomernosti plastickej deformácie M a L sú funkciou veľkosti stredného stupňa deformácie a možno ich popísať lineárnou rovnicou

$$M = a + k.\varepsilon \quad \text{resp.} \quad L = b + k'.\varepsilon \tag{2}$$

kde $k$ resp. $k'$ je materiálová konštanta a pre skúšanú oceľ je $k =$ 0,0492 a $k' =$ 0,4605.

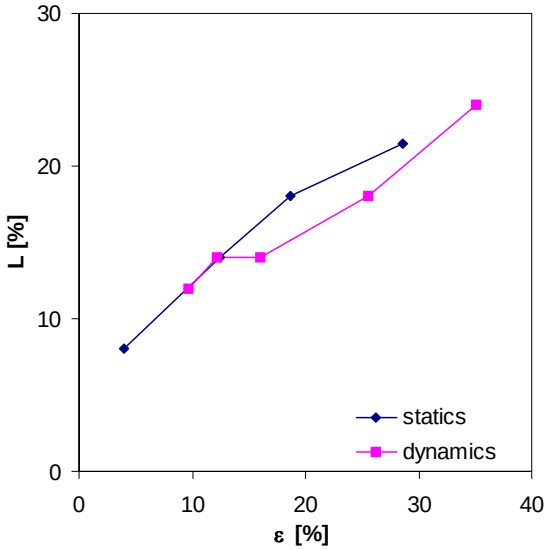


Fig.12 The dependence of variational interval L at medium degree of deformation ε

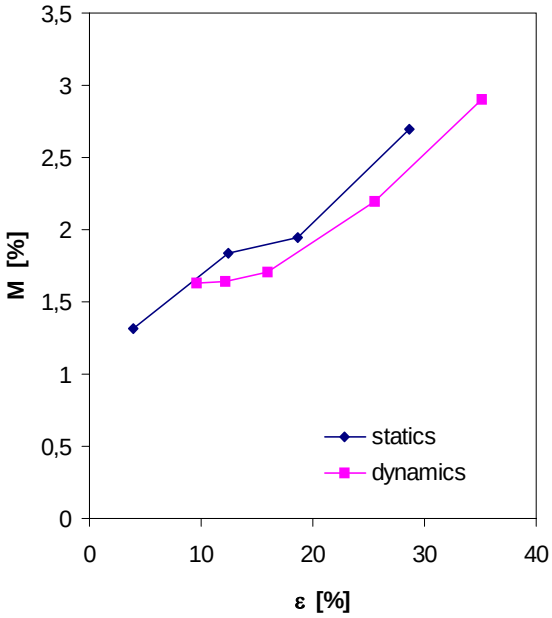


Fig.13 The dependence of micro-heterogeneity of deformation M at medium degree of deformation ε

Výsledky hodnotenia mikronehomogenity plastickej deformácie podobne ako výsledky hodnotenia makronehomogenity potvrdzujú, že v intervale rýchlosti deformácie$10^{-4}$ až $10^{2}s^{-1}$ sa nehomogenita plastickej deformácie s rastom rýchlosti deformácie nemení resp. mierne znižuje, čo treba považovať za priaznivú vlastnosť skúšaných ocelí.

Experimentálne výsledky štúdia rozvoja plastickej deformácie skúšaných ocelí potvrdili, že nehomogenita sa zvyšuje so stupňom plastickej deformácie a je funkciou štruktúry. Na obr.14 je znázornená závislosť hodnoty M od stupňa strednej deformácie ε ušľachtilej uhlíkovej ocele 12013.1 so strednou veľkosťou zrna d = 0,031 mm [3] a skúšanej ocele S 315 MC kde d = 0,009 mm. Z uvedeného vyplýva, že čím je zrno jemnejšie tým je aj nižší stupeň nehomogenity plastickej deformácie. Obr.14 dokumentuje, že aj vplyv rýchlosti deformácie na nehomogenitu plastickej deformácie je funkciou štruktúry. Pri 25% strednej deformácii sa pri dynamickom namáhaní ($10^{2}s^{-1}$) oproti statickému ($10^{-4}s^{-1}$) zvýši nehomogenita M uhlíkovej feritickej ocele s veľkosťou zrna d = 0,031 mm cca o 18 % a u skúšaných mikrolegovaných ocelí je pri dynamickom namáhaní ($10^{2}s^{-1}$) mikronehomogenita na úrovni resp. mierne nižšia ako pri statickom namáhaní.

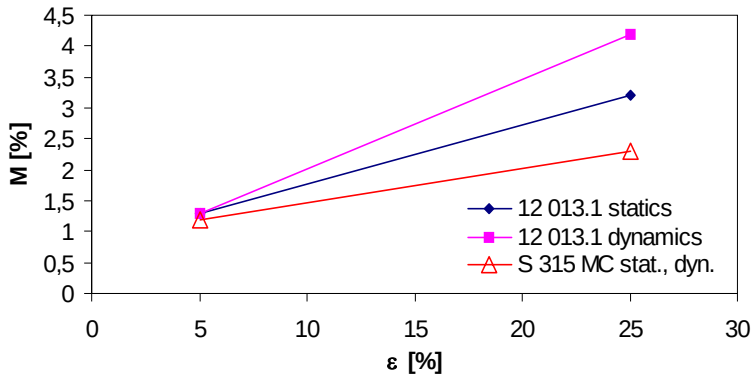


Fig.14 The dependence of heterogeneity criterion of deformation M at medium degree of deformation ε of S 315 MC steel (d = 0,009mm) and 12 013.1 steel (d = 0,031mm)

## 4. Záver

Cieľom príspevku bolo posúdiť rozvoj plastickej deformácie pri statickom ($\dot{\varepsilon}$ = 3,32.$10^{-4}s^{-1}$) a dynamickom ($\dot{\varepsilon}$ = $10^{2}s^{-1}$) ťahovom namáhaní mikrolegovaných ocelí S 315 MC a S 460 MC určených pre tvárnenie za studena. Na základe experimentov, ich rozboru a literárnych poznatkov je možné urobiť tieto závery.

1. Štruktúra skúmaných ocelí je jemnozrná, prakticky jednofázová feritická, pričom sa vo ferite nachádzajú jemné precipitáty legujúcich prvkov Nb. resp. Nb a V. Táto štruktúra dáva predpoklady, že okrem vysokej medze sklzu a medze pevnosti (v porovnaní s uhlíkovými oceľami pre tvárnenie za studena) zaručuje aj vysoké plastické a húževnaté vlastnosti.
2. Nehomogenita plastickej deformácie skúšaných ocelí s rastom stupňa plastickej deformácie sa zvyšuje. Intenzita tohto zvýšenia je oproti uhlíkovým oceliam výrazne nižšia.
3. Zvýšenie rýchlosti namáhania z $10^{-4}$ na $10^{2}$ $s^{-1}$ prakticky neovplyvňuje makro ani mikronehomogenitu plastickej deformácie skúšaných ocelí.

Vzhľadom na súčastný trend zvyšovania rýchlosti tvárnenia a tým aj produktivity majú prezentované výsledky praktický význam, lebo za daných podmienok namáhania v rozsahu rýchlosti deformácie $10^{-4}$ až $10^{2}$ $s^{-1}$ nedôjde k lokalizácii deformácie a teda k strate plastickej stability perspektívnych mikrolegovaných ocelí S-MC určených pre výrobky vyrábané tvárnením za studena. Je samozrejme, že vplyv rýchlosti deformácie na homogenitu plastickej deformácie bude ovplyvnený aj konkrétnym technologickým postupom.

**Literatúra**

[1] Puškár, A.: Mikroplastickosť a porušenie kovových materiálov, VEDA, 1972
[2] Šlesár, M.: Dynamická metalografia procesov deformácie a porušenia zliatin, DDP, UEM SAV, Košice, 1982
[3] Šlesár, M., Micheľ, J., Gerö, R.: Kovové Mater., 7, 1969, 254
[4] Švejcar, J.: Plastická deformace a zpevnění monokrystalu Fe-36Ni při zatěžování vysokými rychlostmi. KDP, VUT Brno, 1986
[5] Micheľ, J., Čižmárová, E., Oružinská, S.: Kovové Mater., 3, 1999, 191
[6] Čižmárová, E. at all: Metalurgija, 41, 2002, 4, 285