

## Laboratorní simulace spojitého válcování za tepla střídavou deformací tlakem ve dvou směrech

### Laboratory simulation of continuous hot rolling by alternating compression in two directions

prof. Ing. Ivo Schindler, CSc.; doc. Ing. Petr Kawulok, Ph.D.; Ing. Petr Opěla, Ph.D.; Ing. Rostislav Kawulok, Ph.D.; Ing. Kateřina Konečná, Ph.D.; Bc. Michal Konderla; Ing. Stanislav Rusz, Ph.D.; doc. Ing. Richard Fabík, Ph.D.; Ing. Josef Němec

VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta materiálově-technologická, 17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava-Poruba, Česká republika

S využitím nově vyvinuté metodiky výpočtu intenzity deformace během tváření na výměnné jednotce MAXStrain II<sup>®</sup> simulátoru HDS-20 (Gleeble 3800-GTC) byly provedeny dvě teplotní varianty simulace spojitého válcování dlouhého vývalku. Potvrdil se zásadní vliv dovalcovací teploty (950 °C nebo 900 °C) v kombinaci s rychlostí ochlazování (5 C·s<sup>-1</sup> nebo 10 °C·s<sup>-1</sup>) na strukturní a mechanické vlastnosti i v případě běžné nízkouhlikové oceli s 0,17 % C, když bylo dosaženo tvrdosti v rozmezí 162 HBW až 190 HBW. Důvodem byly různé podíly fázových složek i odlišná velikost zrna masivního feritu v mikrostruktuře výsledných vzorků. Jednotka MAXStrain II umožňuje dosáhnout střídavou deformací tlakem ve dvou navzájem kolmých směrech extrémní stupně protváření vzorku při poměrně rovnoměrném vývoji struktury v deformační zóně a je tedy vhodný pro simulace vysokoredukčních procesů.

**Klíčová slova:** simulátor deformace za tepla; střídavá deformace tlakem; spojitě řízené válcování a ochlazování

Using a newly developed methodology for calculating the effective strain during forming on the mobile conversion unit MAXStrain II<sup>®</sup> of the HDS-20 simulator (Gleeble 3800-GTC from DSI), two temperature regimes of the long-product's continuous rolling simulation were performed. The fundamental influence of the finishing temperature (950 °C or 900 °C) and the cooling rate (5 C·s<sup>-1</sup> or 10 C·s<sup>-1</sup>) on the structural and mechanical properties was confirmed even in the case of conventional plain-carbon steel with 0.17 % C when the hardness in the range 162 HBW to 190 HBW was achieved. The reason was diverse portions of phase components (massive and acicular ferrite, pearlite and bainite) as well as different grain size of massive ferrite in the microstructure of the resulting samples. Compared to the uniaxial compression test or the plain strain compression test, the applied method of alternating compressions in two mutually perpendicular directions is much more suitable for simulating the bulk forming processes associated with large cumulative strains. The MCU MAXStrain II, unique in the Czech Republic, makes it possible to achieve an extreme degree of sample's deformation with a relatively uniform development of the microstructure in the deformation zone. The weakness of this method is the demanding production of initial samples, limits in the area of rapid temperature changes and very short inter-pass times, but also relatively lower accuracy of control of temperature and partial strain values compared to the more commonly used simulation unit Hydrowedge II<sup>®</sup>. Forming on the MCU MAXStrain II is one of the methods of severe plastic deformation leading to the possibility of obtaining ultra-fine-grained structures of metallic materials.

**Key words:** hot deformation simulator; multi-axis compressions; continuous controlled rolling and cooling

Fyzikální simulace jsou vysoce efektivním nástrojem pro optimalizaci procesů objemového tváření a řízeného ochlazování různých kovových materiálů. Použití specializovaných simulátorů deformace umožňuje přesně ovládat a v širokém rozsahu operativně měnit jednotlivé teplotně-deformační parametry testů v závislosti na čase. V Ostravě jsou v současné době k dispozici dvě taková zařízení. Torzní plastometr (MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o.) dovoluje dosáhnout velkých deformací s vyloučením vnějšího tření, pracuje však v oblasti poměrně nízkých deformačních rychlostí. Kroucené vzorky (obr. 1) z principu vykazují značnou nerovnoměrnost deformace a tím i výsledné mikrostruktury po průřezu [1].



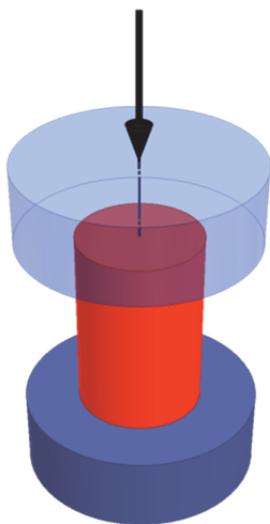
Obr. 1 Schéma zkoušky krutem s barevně odlišenou deformační zónou  
Fig. 1 Torsion test scheme with color-coded deformation zone

Servo-hydraulický simulátor deformací za tepla HDS-20 (resp. Gleeble 3800-GTC – obr. 2) na FMT VŠB-TUO využívá při simulacích přerušované anizotermické zkoušky tlakem různého typu [2, 3]. Zkouška jednoosým tlakem (obr. 3) je nejvhodnější pro napodobování pýchovacích operací. Vzorky (nejčastěji o průměru 10 mm a výšce 15 mm) mohou být ve vakuové komoře odporově ohřáty na teplotu až 1700 °C a tvářeny maximální silou 196 kN (ekvivalent 20 tun). V průběhu každého úběru lze díky výměnné jednotce Hydrawedge II® zajistit téměř konstantní deformační rychlost v rozsahu 0,001 – 100 s<sup>-1</sup>.



Obr. 2 Simulátor HDS-20 v Ostravě s novou řídicí konzolou Gleeble Touch Control a připojenou jednotkou MAXStrain II®

Fig. 2 HDS-20 simulator in Ostrava with new Gleeble Touch Control console and connected MCU MAXStrain II®

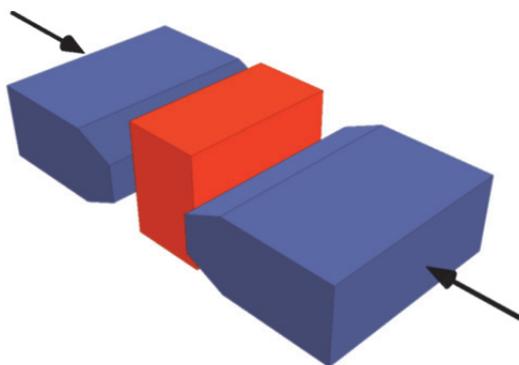


Obr. 3 Schéma zkoušky jednoosým tlakem (červeně vyznačen ohřátý vzorek)

Fig. 3 Uniaxial compression test scheme (heated sample marked in red)

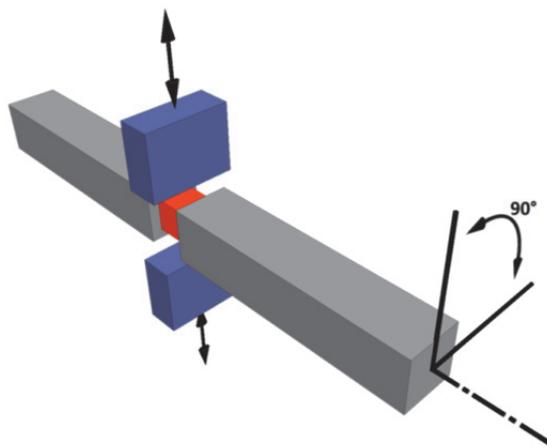
Zkouška tlakem s rovinnou deformací (Plain Strain Compression Test = PSCT) je vhodná zejména pro simulaci procesů válcování a vybraných operací kování. Vzorky jsou deformovány nejčastěji z výchozí výšky 10 mm kovadly užšími, než je počáteční šířka vzorku (obr. 4). Volné konce vzorku pak brání šíření materiálu. V rámci jedné zkoušky lze v závislosti na čase

naprogramovat až 20 úběrů odpovídajících různé teplotě, velikosti i rychlosti deformace (nominálně max. 100 s<sup>-1</sup>), přičemž jednotlivé meziúběrové pauzy mohou trvat i méně než 0,2 s. PSCT umožňuje díky termočládkům navařeným na boční partii deformační zóny relativně nepřesnější řízení rychlých teplotních změn ve fázi tváření i závěrečného ochlazování vzorku.



Obr. 4 Schéma zkoušky tlakem s rovinnou deformací za tepla  
Fig. 4 Hot plain strain compression test scheme

Obě popsané zkoušky ovšem vykazují jeden významný nedostatek, spojený s omezenou možností dosahovat velké kumulované deformace. Pokud bychom např. potřebovali napodobit válcování kulatiny 6 mm ze sochuru kvadrát 155 mm, muselo by se simulovat prodloužení cca 76,4×. To by při pýchování vzorku s výškou 15 mm (jednoosý tlak) zjednodušeně znamenalo redukci výšky na konečných 0,2 mm, což je prakticky neproveditelné. I při PSCT je reálně dosažitelná konečná výška deformované části vzorku asi jen 1 mm. Lze sice pracovat se vzorky o něco větších výchozích rozměrů, ale ty pak neumožňují dostatečně přesné řízení rychlých teplotních změn zejména ve fázi ochlazování zkoumaného materiálu.



Obr. 5 Schéma zkoušky se střídavou deformací tlakem na jednotce MAXStrain II (červeně vyznačena deformační zóna vzorku)

Fig. 5 Test scheme with alternating compressive deformations on the MCU MAXStrain II (deformation zone of the sample marked in red)

Tento zásadní problém by měl být vyřešen střídavou deformací části vzorku ve dvou směrech, když vzorek je v meziúběrových pauzách otáčen podél své podélné osy

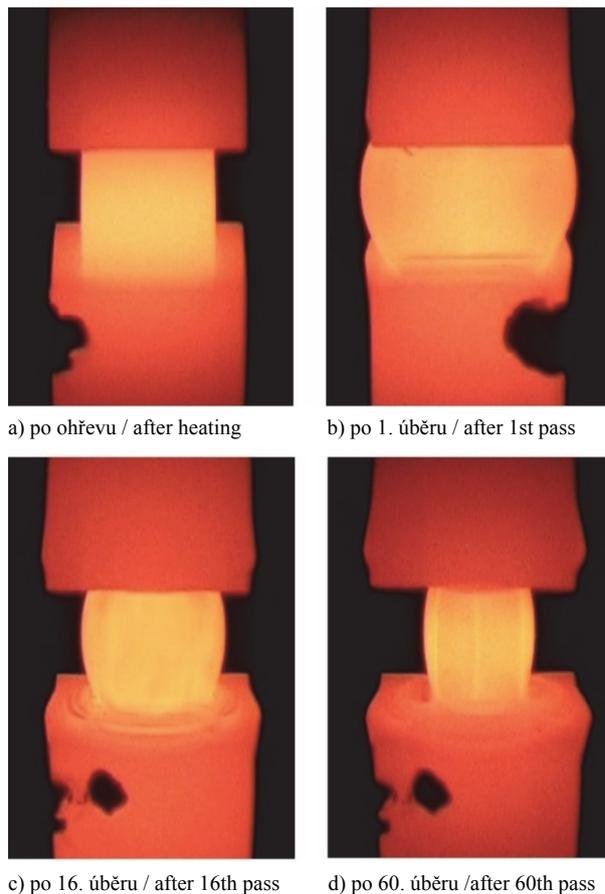
o 90° – viz obr. 5. Výměnná jednotka MAXStrain II® umožňuje naprogramovat až 80 definovaných úběrů s nejkratšími pauzami cca 0,7 s. Odporový ohřev (v případě oceli rychlostí až 50 °C·s<sup>-1</sup>) je řízený prostřednictvím údajů z termočlánku, šikmo zavrtaného přes hlavovou část vzorku do okraje zúžené deformační zóny, jejíž typický výchozí příčný průřez je 10 × 10 mm a délka 12 mm. Nejvyšší rychlost každého z dvojice kovadel je 350 mm·s<sup>-1</sup>, maximální dosažitelná tvářecí síla je 196 kN při statickém zatížení, resp. 80 kN při zatížení dynamickém (vysokými rychlostmi). Při použití vzorku s dutými hlavami je reálná rychlost řízeného ochlazování stlačeným vzduchem až 15 °C·s<sup>-1</sup>, nebo až 1000 °C·s<sup>-1</sup> v případě kalení vodou (při teplotě 550 °C). Popsaný způsob tváření ve dvou na sebe navzájem kolmých směrech je coby jedna z SPD metod intenzivního tváření (Severe Plastic Deformation) vhodná pro získávání ultra-jemnozrnných struktur i simulace různých vysoko-redukčních procesů objemového tváření.

### Určení deformace při tváření ve dvou směrech

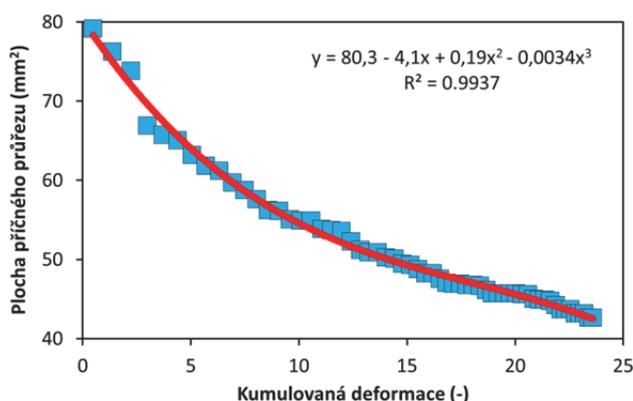
Během zprovoznování jednotky MAXStrain II (v Ostravě od konce roku 2019) se projevila zásadní překážka, bránící jeho běžnému využívání pro simulační účely. Problém spočívá v toku kovu ven z nominální deformační zóny i v případě osové fixace obou hlavových částí vzorku (obr. 6). Z hlediska výpočtu intenzity logaritmické deformace  $e_i$  (-) (jinak řečeno ekvivalentní či efektivní deformace) v každém jednotlivém úběru je pak zásadní, že nelze jednoduše aplikovat zákon stálosti objemu deformační zóny. Byl proto pořízen videozáznam z průběhu testu, kdy byl vzorek z nízkouhlíkové oceli tvářen při nominální teplotě 950 °C celkem 60 úběry s nastavením konstantního limitu proti sobě se pohybujících příčníků (resp. kovadel). Z videa byly získány fotografie tvaru vzorku vždy po našíření vlivem výškové deformace (obr. 7) a z jejich proměření vzešly informace o velikosti dílčích deformací [4].



Obr. 6 Detail termočlánku, deformační zóny vzorku a přilehlých oblastí po tváření střídavou deformací tlakem  
Fig. 6 Detail of thermocouple, deformation zone and adjacent areas of the sample after forming by alternating compressions



Obr. 7 Vývoj tvaru vzorku deformovaného na jednotce MAXStrain II v závislosti na počtu úběrů  
Fig. 7 Development of the shape of the sample deformed on the MCU MAXStrain II depending on the number of passes



Obr. 8 Změna příčného průřezu deformované části vzorku s postupně kumulovanou deformací  
Fig. 8 Change in the cross section of the deformed part of the sample with gradually accumulated strain

Klíčové je zjištění, že s rostoucí kumulovanou deformací se postupně zmenšuje příčný průřez deformované části vzorku, a to zhruba podle vztahu uvedeného v obr. 8. Regresními funkcemi se podařilo s dobrou přesností popsat i závislost šířky – tzn. deformace  $e_B$  (-) – na velikosti výškové deformace  $e_H$  (-) a zdánlivou deformaci ve směru délky  $e_L$  (-) jako funkci kumulované intenzity deformace. Z takto zjištěných složek deformace ve třech

navzájem kolmých směrech pak lze zjednodušeně vypočítat hodnotu intenzity deformace pro jednotlivé úběry podle vzorce

$$e_i = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot (e_H^2 + e_B^2 + e_L^2)} \quad (1)$$

Naznačený výpočetní postup je poměrně jednoduchý, zvládnutelný v běžném tabulkovém procesoru, ale pravděpodobně ne zcela univerzální. Měl by být upřesněn pro jiné typy tvářených vzorků (co se týče jejich tvaru či rozměrů) a pro zásadně odlišné typy zkoumaného materiálu s jinými teplotami deformace, například slitiny hliníku. Popsaným problémem se již dříve zabývali i jiní autoři – viz např. [5, 6]. Jejich složité výpočty založené na tenzorovém nebo integrálním počtu však v žádném případě nedávají možnost výpočtu intenzity deformace jen na základě publikovaných údajů.

### Simulace válcování pomocí jednotky MAXStrain II

Při zjednodušené simulaci spojitého válcování dlouhého vývalku z nelegované nízkouhlíkové oceli, obsahující 0,17 C – 0,80 Mn – 0,29 Si (vše v hm. %), byla využita originální metodika výpočtu velikosti dílčích deformací. Díky ní mohly být u jednotlivých úběrů nastaveny limity pohybu kovadel tak, aby bylo dosahováno žádaných deformací. Fiktivní válcování probíhalo na trati se čtyřmi pořadími, a to ve dvou teplotních variantách:

- **1. pořadí** – předválcování: teplota 1140 – 1120 °C, 4 průchody s deformací 0,30 při rychlosti kovadla 60 mm·s<sup>-1</sup>, meziúběrové pauzy 4,5 – 3,5 s; ochlazovací pauza 6 s;
- **2. pořadí**: teplota 1080 – 1060 °C, 6 průchodů s deformací 0,25 při rychlosti kovadla 80 mm·s<sup>-1</sup>, meziúběrové pauzy 3,0 – 2,4 s; ochlazovací pauza 6 s;
- **3. pořadí**: teplota 1020 – 1010 °C, 6 průchodů s deformací 0,20 při rychlosti kovadla 100 mm·s<sup>-1</sup>, meziúběrové pauzy 1,5 – 1,0 s; ochlazovací pauza 12 s;
- **4. pořadí** – hotovní (doválcování): teplota 910 – 950 °C nebo 850 – 900 °C (s naprogramovaným lineárním nárůstem teploty vlivem deformačního tepla), 10 průchodů s deformací 0,15 při rychlosti kovadla 300 mm·s<sup>-1</sup>, meziúběrové pauzy 0,7 s.

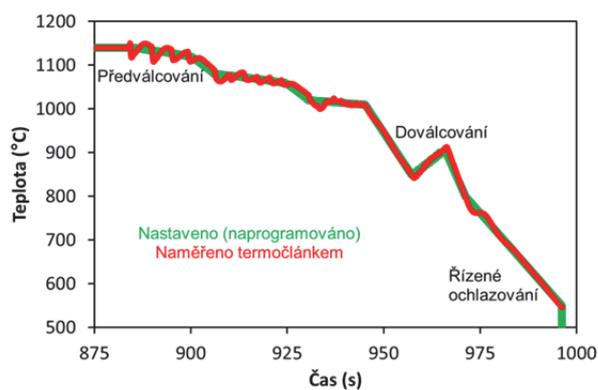
Výchozí vzorky měly duté hlavy a deformační zónu o rozměrech 10 × 10 × 12 mm. Kumulovaná intenzita deformace 5,8 odpovídá prodloužení během výroby dlouhého vývalku asi 330×. Závěrečné ochlazování probíhalo po vysokoteplotním doválcování rychlostí 20 °C·s<sup>-1</sup> na teplotu 900 °C a poté rychlostí 5 °C·s<sup>-1</sup> na 550 °C, po nízkoteplotním doválcování se rychlostí 20 °C·s<sup>-1</sup> ochlazovalo na teplotu 800 °C a z ní pak na teplotu 550 °C rychlostí 10 °C·s<sup>-1</sup>. Na obr. 9 je porovnán tvar výchozího vzorku a dvou vzorků po řízeném ochlazování, vystavených v různé pozici vzhledem ke směru poslední deformace.



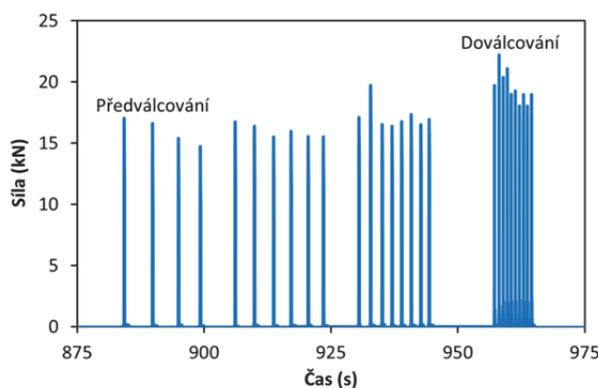
Obr. 9 Centrální partie vzorků před deformací (nahore) a po simulacích

Fig. 9 Central parts of samples before deformation (above) and after simulations

Grafy na obr. 10 dokumentují časový průběh teploty i tvářecí síly odpovídající nízkoteplotní variantě simulace. Je zřejmé, že pomalé úběry (s poměrně dlouhou dobou styku chladných kovadel s tvářeným vzorkem) vedou ke kolísání naměřené teploty. Obrázek 11 dokazuje vysokou přesnost a reprodukovatelnost experimentu z hlediska časové posloupnosti dílčích úběrů a rovněž relativní nárůst tvářecích sil v důsledku snížení doválcovacích teplot.



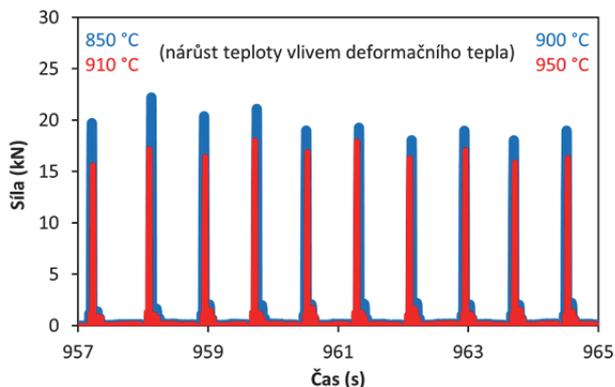
a) teplota / temperature



b) tvářecí síla / forming force

Obr. 10 Veličiny zaznamenané při simulaci s nízkoteplotní variantou doválcování

Fig. 10 Quantities recorded during the simulation with the low-temperature rolling regime



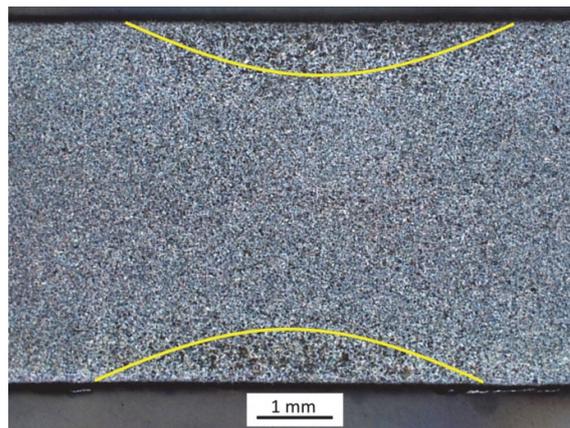
Obr. 11 Vliv teploty na tvářecí síly při simulaci dovalcování (posledních 10 průchodů)

Fig. 11 Influence of temperature on forming forces in simulation of finishing rolling (last 10 passes)

### Analýza výsledných struktur

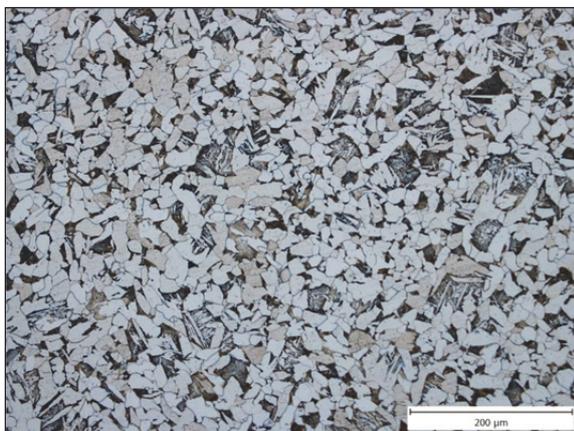
Jak ukázaly metalografické analýzy po simulacích, provedené ve středových oblastech řezů vedených příčně přes finální tloušťku vzorku, v kuželovitých podpovrchových oblastech je struktura hrubozrnnější v důsledku tření mezi kovadlem a příslušnou plochou vzorku (obr. 12). Je to dáno samozřejmým zbrzděním plastické deformace v dané partii [7]. Heterogenita struktury však vypadá méně výrazná ve srovnání s jinými vzorky, tvářenými dříve jednoosým tlakem nebo PSCT [8, 9], což lze

vysvětlit střídavým působením kovadel ve dvou vzájemně na sebe kolmých směrech. Na obr. 13 jsou porovnány mikrostruktury středových oblastí vzorků po obou režimech simulace. S využitím počítačové analýzy obrazu a softwaru QuickPHOTO INDUSTRIAL 3.2 bylo zjištěno, že zvýšení dovalcovací teploty o 50 °C a snížení rychlosti závěrečného ochlazování o polovinu vedlo ke snížení výskytu acikulárního feritu i bainitu a ke zvětšení střední velikosti zrna masivního feritu z 8,0 μm na 14,1 μm. To vše se projevilo poklesem tvrdosti ze 190 HBW na 162 HBW.

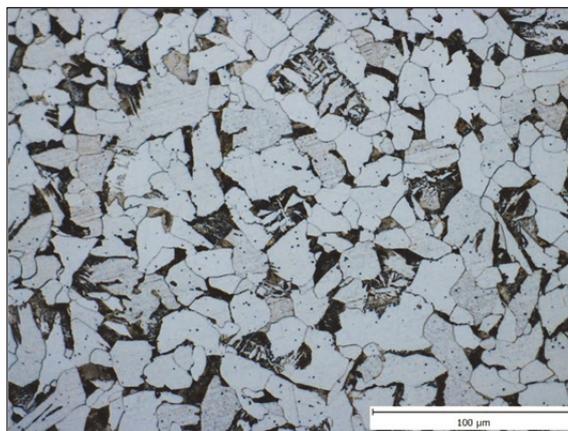


Obr. 12 Nerovnoměrnost struktury ve středu deformační zóny

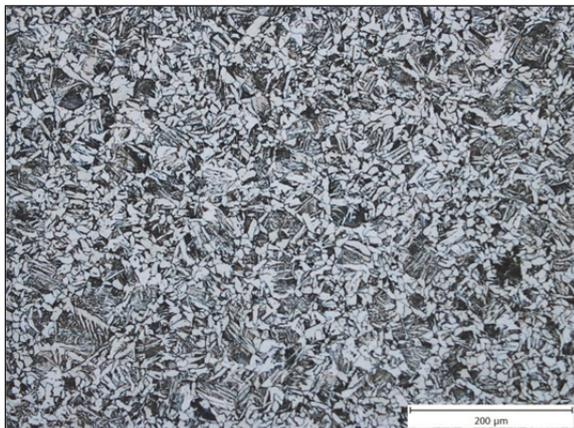
Fig. 12 Heterogeneity of structure in the middle of deformation zone



a) vysokoteplotní dovalcování / high-temperature finishing



b) vysokoteplotní dovalcování – detail / high-temperature finishing – detail



c) nízkoteplotní dovalcování / low-temperature finishing

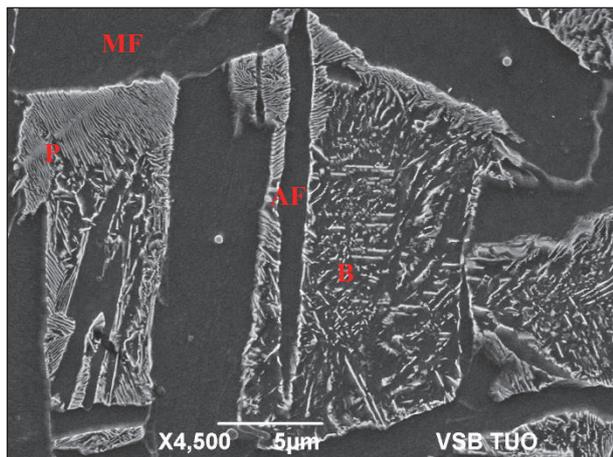


d) nízkoteplotní dovalcování – detail / low-temperature finishing – detail

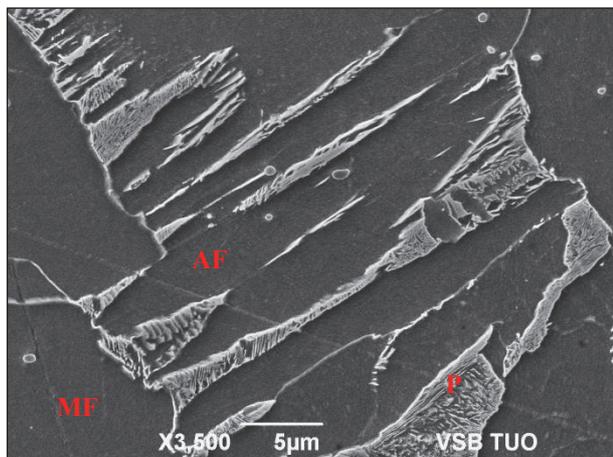
Obr. 13 Mikrostruktura ve středové oblasti vzorků po simulaci

Fig. 13 Microstructure in the central area of the samples after simulation

Po leptání výsledných vzorků v Nitalu byl ověřen výskyt strukturních složek pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu JEOL JSM-6490LV – viz detaily na obr. 14. Dokumentace byla pořízena v režimu sekundárních elektronů (SEM SEI). V oblastech hranic původních austenitických zrn převažuje masivní ferit (MF) s ostrůvky perlitu (P). Uvnitř původních zrn převažuje acikulární ferit (AF) – v případě vysokoteplotního dovalcování se mezi feritickými jehlicemi vyskytuje perlit a místy i bainit (B), v případě nízkoteplotního dovalcování (a rychlejšího ochlazování) je zřejmý větší podíl bainitu a perlit se zde vyskytuje jen ve stopovém množství.



a) všechny 4 složky / all 4 components



b) jehlice acikulárního feritu / acicular ferrite needles

Obr. 14 Detaily strukturních složek (SEM SEI)

Fig. 14 Details of the structure components (SEM SEI)

## Závěr

S využitím nově vyvinuté metodiky výpočtu intenzity deformace během tváření střídavě ve dvou směrech byly provedeny dvě teplotní varianty simulace spojitého válcování a řízeného ochlazování. Bylo prokázáno, že ve srovnání se zkouškami jednoosým tlakem nebo tlakem s rovinnou deformací je aplikovaná metoda velmi vhodná pro simulaci tvářecích procesů spojených s velkými kumulovanými deformacemi. Jednotka MAXStrain II simulátoru HDS-20 umožňuje dosáhnout extrémní stupně

protváření vzorku při relativně rovnoměrném vývoji struktury v deformační zóně. Slabinou této metody je náročná výroba výchozích vzorků, limity v oblasti dosahování rychlých teplotních změn a velmi krátkých meziúběrových pauz, ale i relativně menší přesnost řízení teploty a velikosti dílčích deformací (např. ve srovnání s běžněji používanou jednotkou Hydrawedge II). K podobným závěrům dospěli i autoři srovnávací studie [10]. Co se týče výsledků vlastního experimentu, potvrdil zásadní vliv dovalcovací teploty a zejména ochlazovacích podmínek na strukturní a mechanické vlastnosti i v případě běžné nízkouhlíkové oceli s 0,17 % C. Zvýšení dovalcovací teploty z 900 °C na 950 °C a snížení rychlosti závěrečného ochlazování z 10 °C·s<sup>-1</sup> na 5 °C·s<sup>-1</sup> vedlo k poklesu obsahu acikulárního feritu i bainitu a ke zvětšení střední velikosti zrna masivního feritu z 8,0 μm na 14,1 μm. To vyústilo ve snížení tvrdosti ze 190 HBW na 162 HBW.

## Poděkování

Tento článek byl vytvořen díky projektu č. CZ.02.1.01/0.0/0.0/17\_049/0008399 z finančních fondů EU a ČR poskytovaných "Operačním programem Výzkum, vývoj a vzdělávání, Výzvy 02\_17\_049 Dlouhodobá mezisektorová spolupráce pro ITI, řídicí orgán: Česká Republika - Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy" a v rámci projektu SP2022/73 a SP2022/68 studentské grantové soutěže podporované na VŠB – TU Ostrava Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

## Literatura

- [1] SCHINDLER, I. and BOŘUTA, J. *Utilization Potentialities of the Torsion Plastometer*. Silesian Technical University. Katowice 1998. 106 s. ISBN 83-910722-0-7.
- [2] SCHINDLER, I. and KAWULOK, P. Aplikační možnosti plastometru Gleeble 3800 se simulačním modulem Hydrawedge II na VŠB-TU Ostrava. *Hutnické listy*, 66 (2013) 4, 85–90.
- [3] Gleeble Thermal-Mechanical Simulation System Catalog and Specifications. Dynamic Systems Inc., 2022. Dostupné na [www.Gleeble.com/Catalog](http://www.Gleeble.com/Catalog).
- [4] NAVRÁTIL, H. et al. Determination of the strain value during severe forming on the multi-axis deformation unit MAXStrain II. In *31<sup>st</sup> International Conference on Metallurgy and Materials - METAL 2022*. V tisku.
- [5] PETRYK, H. and STUPKIEWICZ, S. A quantitative model of grain refinement and strain hardening during severe plastic deformation. *Materials Science and Engineering, A* 444 (2007), 214–219.
- [6] BEREZKI, P., SZOMBATHELYI, V. and KRÁLLICS, G. Determination of flow curve at large cyclic plastic strain by multiaxial forging on MaxStrain System. *International Journal of Mechanical Sciences*, 84 (2014), 182–188.
- [7] LIN, Y.C., CHEN, M.S. and ZHONG, J. Numerical simulation for stress/strain distribution and microstructural evolution in 42CrMo steel during hot upsetting process. *Computational Materials Science*, 43 (2008) 4, 1117–1122.
- [8] KAWULOK, P. a kol. Anizotermické přerušované zkoušky tlakem slitiny Al Mg3. *Kovárenství*. (2016) 57, 23–28.
- [9] SCHINDLER, I. a kol. Plastometrická simulace dovalcování a ochlazování mikrolegované C-Mn-V-B oceli. *Hutnické listy*, 66 (2013) 4, 61–66.
- [10] Bezobrazov, Yu. A., Kolbasnikov, N. G., Naumov, A. A. Tension-compression method in the simulation of multistage plastic deformation. *Steel in Translation*, 44 (2014) 1, 71–79.