

# HODNOCENÍ NÁCHYLNOSTI OCELI 3,5Ni-1,5Cr K POPOUŠTĚCÍ KŘEHKOSTI

Jakub HORNÍK, Tomáš JETMAR, Maxim PUCHNIN

Ústav materiálového inženýrství, fakulta strojní ČVUT v Praze, Karlovo nám. 13, 121 35, Praha 2, CZ, e-mail: jakub.hornik@fs.cvut.cz., tomas.jetmar@fs.cvut.cz, maxim.puchnin@fs.cvut.cz

## Abstrakt

*Příspěvek hodnotí vliv dlouhodobého popouštění na mikrostrukturu a houževnatost oceli 3,5Ni1,5Cr využívané k výrobě velkých hřídelů především v lodním a energetickém průmyslu. Ocel byla po austenitizaci 1200 °C / 2 h a zakalení do oleje popouštěna v rozsahu teplot (200 – 700) °C po dobu 100 h. Sledovány byly rovněž změny tvrdosti. V intervalu teplot (300 – 500) °C byl zjištěn pokles hodnot nárazové práce, který však nevede ke kritickému zkřehnutí oceli.*

## Úvod

Výroba hmotných odlitků a jejich následné tváření volným kováním je specifickým technologickým procesem. Vzhledem k faktu, že se jedná prakticky o kusovou technologicky i ekonomicky náročnou výrobu, je nezbytné věnovat zvýšenou pozornost kvalitě výrobku. Je třeba uvažovat velký zpracovávaný objem materiálu a tím i zcela odlišné podmínky pro průběh deformačních a tepelných jevů v porovnání s výrobky běžné velikosti. Precipitace má výrazný vliv na průběh mikrostrukturních změn během opakované deformace při tváření a následném tepelném zpracování a tím na finální vlastnosti výrobku. Nežádoucí intenzivní precipitace částic po hranicích zrn pak může vést ke zkřehnutí oceli, což následně negativně ovlivňuje tvařitelnost a zejména houževnatost hotového dílu [1 - 3]. Práce je součástí výzkumu příčin vzniku vad hmotných výkovků s ohledem na eliminaci mikrostrukturálních defektů a lokálních nehomogenit.

## Experimentální materiál

Materiál byl dodán firmou Pilsen Steel s.r.o. ve formě hranolů odebraných z výkovku rotoru z oceli typu 3,5Ni-1,5Cr, jejíž chemické složení je uvedeno v tabulce 1.

**Tab. 1:** Chemické složení hodnocené oceli

Prvek [hm %]	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Al	N
Ni-Cr	0,21	0,31	0,10	0,004	0,002	1,75	3,58	0,46	0,08	0,008	0,003

## Experimentální metody

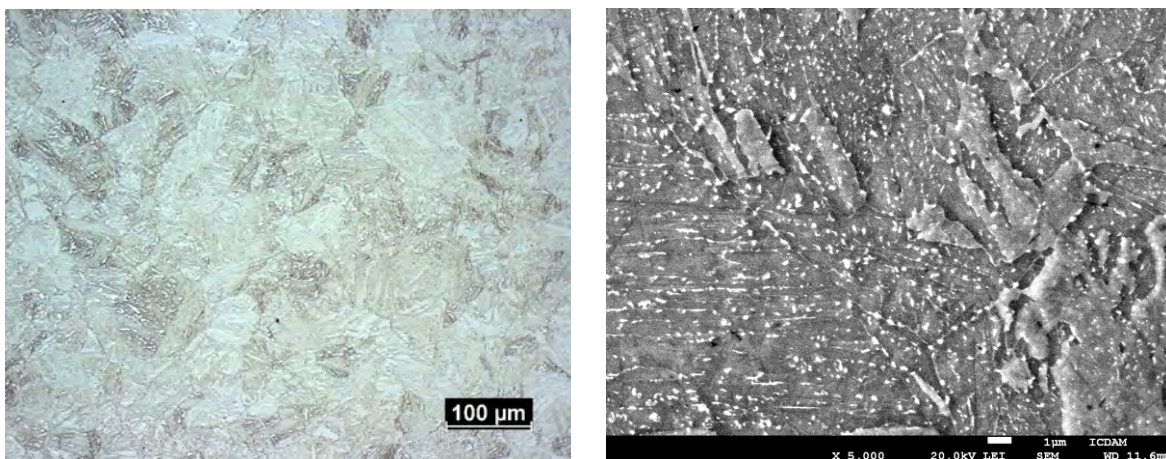
Tepelné zpracování probíhalo v elektrické odporové peci LAC na vzorcích o velikosti cca 60 x 15 x 15 mm opatřených nátěrem KALSEN v zásypu korundu a drceného koksu pro omezení oxidace a oduhličení vzorků. Vzorky byly nejprve austenitizovány při teplotě 1200 °C po dobu dvou hodin a poté zakaleny do oleje. Následně byly popouštěny při teplotách 200, 300, 400, 500, 600 nebo 700 °C. Výdrž na teplotě byla zvolena 100 hodin. Tento časový úsek simuluje dlouhodobé

výdrže na teplotě při zpracování hmotných výkovků a zvýrazňuje případné nežádoucí precipitační jevy. Na závěr byly vzorky vyjmuty z pece a chladly volně na vzduchu.

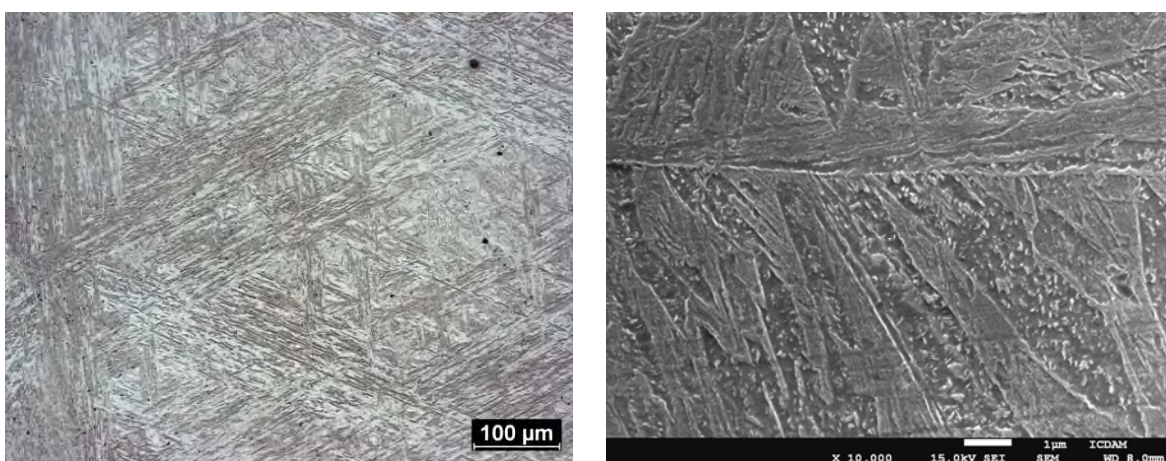
Po provedeném tepelném zpracování byla ze vzorků obrobena normalizovaná zkušební tělesa s V vrubem, a provedena zkouška rázem v ohybu na Charpyho kladivu PH 300 při teplotě 20 °C. Na přeražených vzorcích byla změřena tvrdost metodou dle Vickerse. Strukturní změny byly hodnoceny světelnou mikroskopií na metalografických výbrusech z příčných řezů zkušebních těles. Detailněji byly sledovány přítomné karbidické částice s využitím elektronového mikroskopu Jeol JSM 7600F. Mikrostruktura byla vyvolána leptadly NITAL případně Villela-Bain.

### **Výsledky a diskuse výsledků**

V dodaném stavu je mikrostruktura oceli 3,5Ni-1,5Cr tvořena převážně horním bainitem a ostrůvky feritu s polyedrickým původním austenitickým zrnem o velikosti. (70 – 90) μm (obr. 1). Karbidické částice jsou rovnoměrně rozloženy jednak po hranicích zrn jednak kolem feritických jehlic. Austenitizace s výdrží 2 hodiny a následné zkalení do oleje vede ke zvětšení velikosti původního austenitického zrna na cca 660 μm (obr. 2). Mikrostrukturu tvoří směs martenzitu, spodního bainitu a ostrůvky zbytkového austenitu. Převládá jemný jehlicovitý precipitát typu  $M_2C$ .

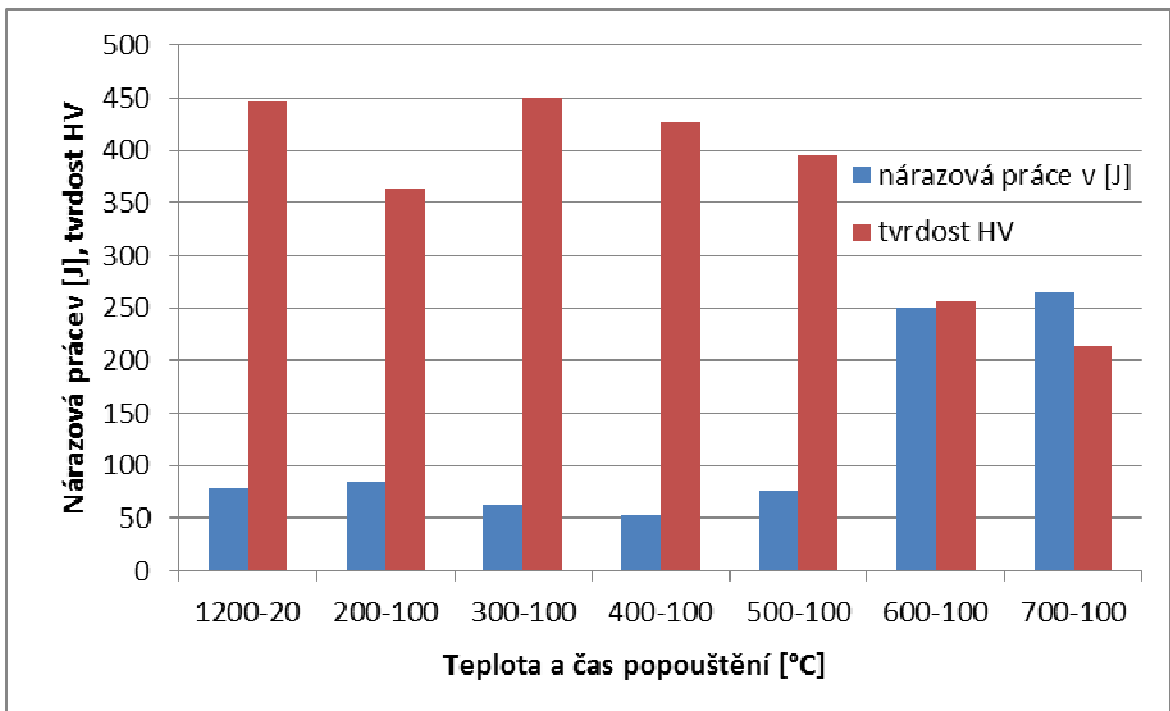


**Obr. 1:** Mikrostruktury ocelí 3,5Ni-1,5Cr v dodaném stavu – SM, SEM



**Obr. 2:** Mikrostruktury ocelí 3,5Ni-1,5Cr v zakaleném stavu – SM, SEM

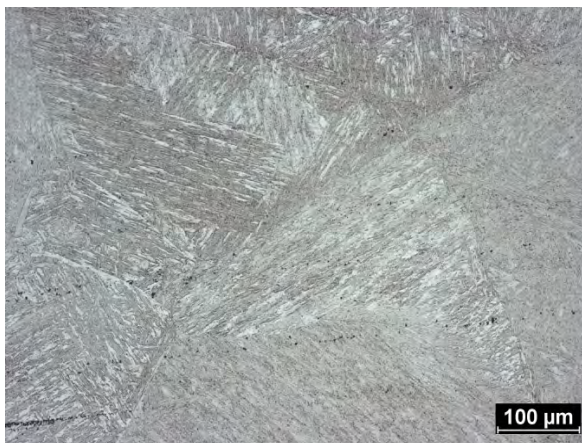
Výsledky měření nárazové práce a tvrdosti jsou souhrnně uvedeny v grafu na obr. 3. Z výsledků je zřejmé že se zvyšující se teplotou popouštění nedochází ke zvyšování houževnatosti a poklesu tvrdosti.



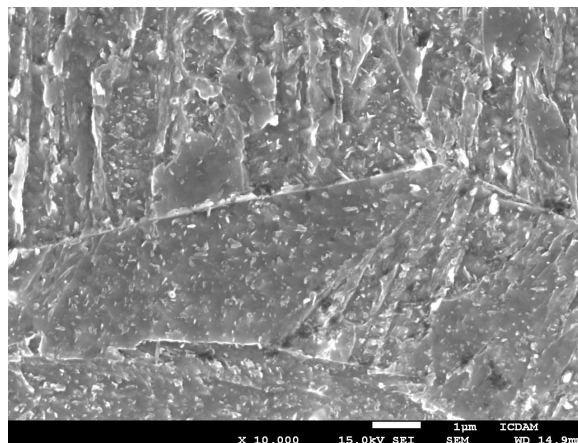
**Obr. 3:** Změny nárazové práce a tvrdosti v závislosti na teplotě popouštění.

Zatímco při teplotě popouštění 200 °C se tvrdost v důsledku redistribuce uhlíku v martenzitické matici snížila při mírném nárůstu houževnatosti, v oblasti teplot 300 °C a 400 °C je naopak patrný nárůst tvrdosti na hodnoty odpovídající kalenému stavu a pokles houževnatosti. Hodnoty nárazové práce se snížily ze 78 J v kaleném stavu na 50 J při teplotě popouštění 400 °C. Tento jev je spojován s precipitací karbidů podél hranic zrn a je také často označován jako popouštěcí křehkost. Při teplotě 500 °C je již patrné zvýšení hodnot nárazové práce na úroveň zakaleného stavu a snižování tvrdosti sledované oceli. Při vyšších teplotách již dochází k výraznějším strukturním změnám a s nimi spojenému značnému poklesu tvrdosti a nárůstu houževnatosti.

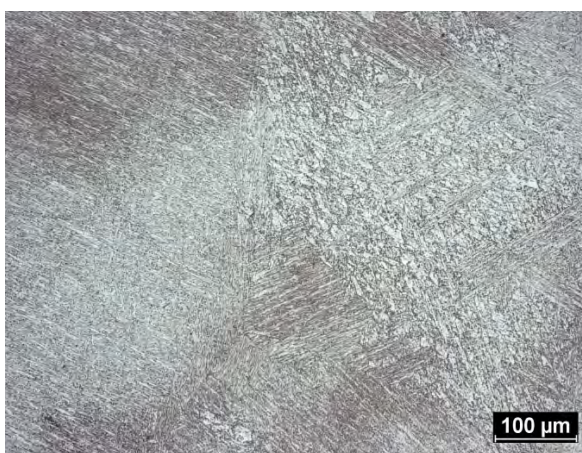
Metalografické hodnocení mikrostruktur získaných při různých teplotách popouštění ukazuje na postupné přibývání množství precipitátu a změnu morfologie těchto částic. Zatímco rozdíly mezi zakaleným stavem a stavem po popouštění při teplotě 200 °C nejsou patrné, při teplotě popouštění 300 °C se již vyskytuje relativně homogenně vyloučený jemný sférický precipitát, pravděpodobně typu  $M_3C$  (obr. 4 a, b). Tyto částice se vyskytují jednak po hranicích bainitických útvarů a jednak po hranicích zrn. Při teplotě popouštění 400 °C mírně narůstá velikost hrubších částic i jejich počet. Další zvýšení teploty na 500 °C je provázeno výskytem precipitátu o velikosti cca 100 nm, ojediněle byly pozorovány i částice velikosti téměř 1  $\mu m$ . Se zvýšením teploty na 600 °C se velikost precipitátu zvyšuje a začíná zanikat původní zanikat jehlicovité uspořádání mikrostruktury. Při nejvyšší sledované teplotě 700 °C (obr. 4 c, d) již velikost precipitátu dosahuje hodnot (0,5 – 1)  $\mu m$ . Patrné jsou i rekrystalizované oblasti s polyedrickým feritickým zrnem.



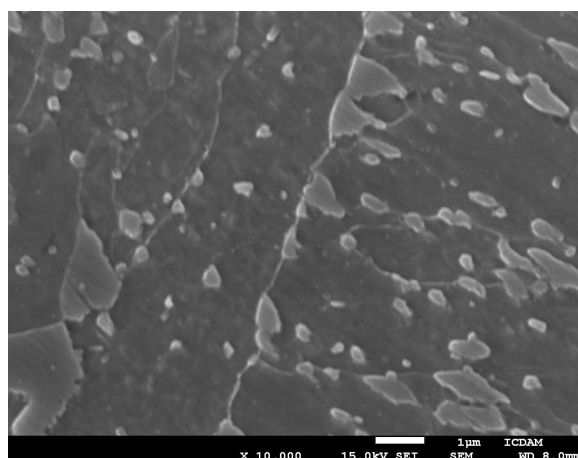
a) 300 °C, SM



b) 300°C, SEM



c) 700 °C, SM

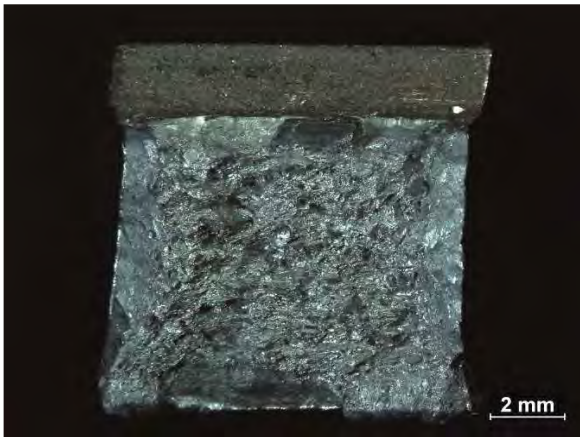


d) 700 °C SEM

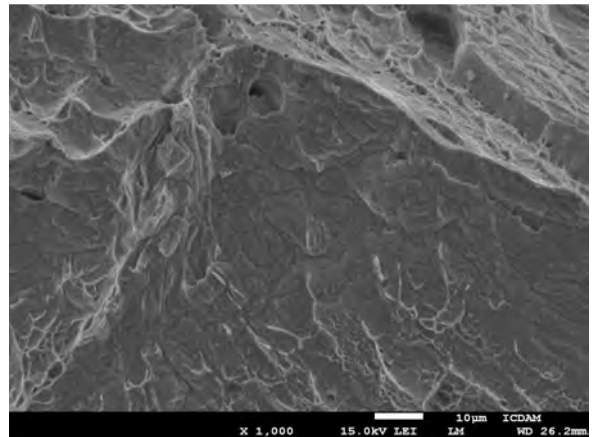
**Obr. 4:** Mikrostruktura oceli 3,5Ni-1,5Cr po zakalení 1200°C/2h/olej a popouštění po dobu 100 h

Lomové plochy vzorků po zkoušce rázem v ohybu byly nejprve zdokumentovány stereomikroskopem a následně byly podrobněji analyzovány s využitím skenovacího elektronového mikroskopu (obr. 5). Lomy v rozsahu teplot popouštění (200 – 500) °C vykazuje smíšený charakter lomu s převládajícím štěpným porušením. V oblastech štěpného lomu má porušení převážně transkrystalický charakter. Interkrystalický lom byl pozorován pouze lokálně a to na jehlicovitých útvarech martenzitu a bainitu. V těchto oblastech je porušení často doprovázeno výskytem precipitátu na povrchu jehlic (obr. 5 d). Od teploty 600 °C se vyskytuje téměř výhradně lom s jamkovou morfológií (obr. 5 e). Patrné je rovněž výrazné množství převážně sférických částic, které se vyskytují v prakticky rovnoměrně v celém objemu materiálu (obr. 5 f).

Charakter lomu dokazuje snížení houževnatosti v oblasti popouštěcích teplot (300 – 500) °C. Rozložení částic je relativně homogenní, a jejich výskyt není přednostně indikován po hranicích zrn. Za daných podmínek nebyla prokázána přednostní iniciace lomu na hranicích původních austenitických zrn potenciálně oslabených částicemi precipitujícími během popouštění. Na lomových plochách se vyskytuje interkrystalické porušení jen omezeně a to pouze v izolovaných mikroskopických oblastech po hranicích některých jehlicovitých útvarů.



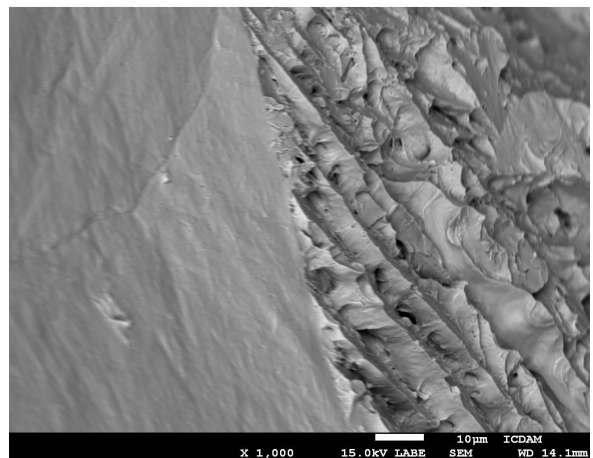
a) Zakalený stav SM



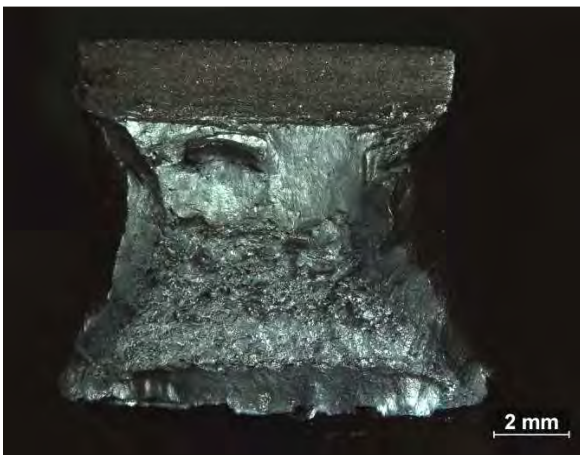
b) Zakalený stav SEM



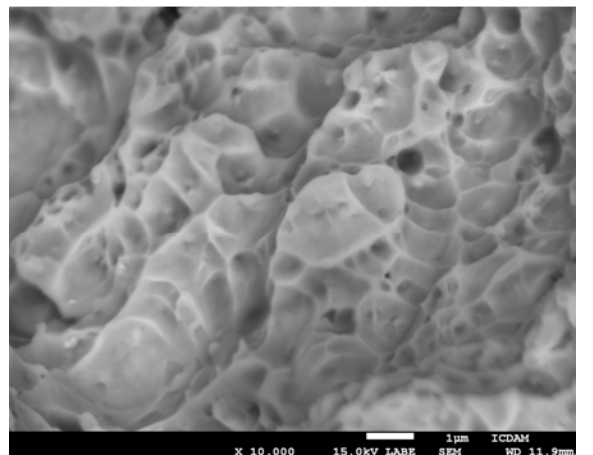
c) 300 °C / 100 h



d) 300 °C / 100 h, SEM



e) 700 °C / 100 h



f) 700 °C / 100 h, SEM

**Obr. 5:** Vzhled lomových ploch po zakalení 1200 °C /2h/ olej a popuštění při 300 °C a 700 °C

## Závěry

Práce vyhodnotila strukturální změny a změny mechanických vlastností rotorové oceli 3,5Ni-1,5Cr zakalené z teploty 1200°C a následně popuštěné v rozsahu teplot (200 - 700) °C, při výdrži na teplotě 100 hodin.

V mikrostruktuře vzorků popuštěných při nízkých teplotách (200 a 300 °C) se ve směsi martenzitických jehlic a útvarů bainitu vyskytuje jemný jehlicovitý precipitát typu  $M_2C$ .

Vyšší teploty zpracování vedou ke vzniku popuštěného martenzitu za výskytu jemných sférických karbidů typu  $M_3C$ , jejichž velikost s teplotou výrazně narůstá.

Od teploty 600 °C precipitát výrazně hrubne, v mikrostruktuře postupně zaniká její původní jehlicovitý charakter a je pozorována lokální rekrystalizace feritu.

V porovnání se zakaleným stavem a popouštěním při teplotě 200 °C se v oblasti teplot (300 – 500) °C snižuje hodnota nárazové práce a tvrdost se blíží hodnotám zakaleného stavu. Nejnižší houževnatost 50 J vykazuje teplota 400 °C a nejvyšší tvrdost 450 HV je dosažena po popouštění při teplotě 300 °C.

Byl prokázán pokles houževnatosti za teplot popouštění 300, 400 a 500 °C. Dosažené nejnižší hodnoty nárazové práce jsou 50 J avšak s minimálním výskytem nežádoucího interkrystalického štěpného lomu. Vzhledem k tomu lze doporučit vyhnout se těmto teplotám, případně omezit dobu setrvání materiálu v této teplotní oblasti.

## LITERATURA

- [1] Žídek, M. – Dědek, V. – Sommer, B.: *Tváření oceli*. SNTL/ALFA, Praha, 1988. 520 s.
- [2] Žídek, M.: *Metalurgická tvařitelnost ocelí zatepla a zastudena*. ALEKO, Praha, 1995. 360 s. ISBN 80-85341-45-X.
- [3] Dieter, G. E. – Kuhn, H. A. – Semiatin, S. L.: *Handbook of workability and process design*, ASM INT., 2003

## Poděkování

Příspěvek vznikl s podporou projektu MPO TI2/132.0 v laboratořích ÚMI - ICDAM FS ČVUT v Praze (projekt OPPK CZ.2.16/3.1.00/21037).