

Zkoušení technologie řízeného válcování bezešvých trubek Line Pipe z konstrukční oceli X52N PSL2 a L360NE PSL2 za snížených teplot na laboratorní válcovací stolici duo VŠB – Technická univerzita Ostrava a v provozu Válcovna trub Třineckých železáren, a.s.

Testing of the Controlled Rolling Technology of the Seamless Line Pipes made from Cold Tempered Structural Steels X52N PSL2 and L360NE PSL2 at the Two-High Laboratory Rolling Mill at VŠB – Technical University of Ostrava and in the process plant of the Tube Mill of Třinecké železáreny, a.s.

Ing. Rostislav Turoň¹; Ing. Petr Víték¹; Ing. Petra Turoňová, Ph.D.¹; Ing. Radek Jurča¹; prof. Ing. Ivo Schindler, CSc.²; Ing. Stanislav Rusz, Ph.D.²; Ing. Rostislav Kawulok, Ph.D.²

¹ TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, a. s., Průmyslová 1000, 73970 Třinec-Staré město, Česká republika

² VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta materiálově technologická, 17. listopadu 2172/15, 708 33 Ostrava-Poruba, Česká republika

Příspěvek se zabývá jednou z etap aplikovaného výzkumu a vývoje v oblasti tváření bezešvých trubek vyráběných v provozu Válcovna trub TŘINECKÝCH ŽELEZÁREN, a. s. s cílem zlepšit pevnostní vlastnosti u mikrolegovaných ocelí C – Line Pipe ocelí X52 (dle API spec. 5L) a L360 (dle ISO 3183). Cílem experimentálního teplotně řízeného válcování bylo dosáhnout zjemnění struktury a mírného zvýšení pevnostních charakteristik po následném normalizačním žihání a ochlazování sprchováním bezešvých trubek s tloušťkou stěny nad 30mm dle požadavků normy API spec. 5L, ISO 3183 a zároveň EN 10208. Válcování probíhalo za různého teplotního režimu (konvenční režim v teplotním rozmezí 1050 – 1100 °C a režim řízeného válcování v teplotním rozmezí 830 – 960 °C). U laboratorních experimentů byly stanoveny i teploty fázových přeměn pomocí dilatometrického modulu plastometru Gleeble 3800. Výsledky experimentů prokázaly příznivý vliv snížené doválcovací teploty na zjemnění mikrostruktury. Došlo ke zjemnění zrna s hodnotami $G = 9 - 10$ při válcování za nižších teplot oproti hodnotám $G = 7 - 8$ u konvenčního způsobu válcování bez snížených teplot. Zásadním zjištěním bylo, že snížení doválcovacích teplot nevede k evidentnímu zvýšení meze kluzu či pevnosti po normalizačním žihání. To vedlo k rozhodnutí pro vytvoření technického návrhu a realizaci funkčního prototypu pro řízené ochlazování trubek po normalizaci s dosažením vhodné struktury, zvýšení pevnostních charakteristik s žádným nebo minimálním dopadem na křehkolomové vlastnosti materiálu, a to ve středu tloušťky stěny.

Klíčová slova: mikrolegované oceli; Line Pipe oceli; řízené ochlazování trubek

The paper deals with one of the stages of applied research and development in the area of seamless tube forming and it is aimed at the improvement of the strength properties of microalloyed carbon steels - Line Pipe of the grades X52 (according to the API spec. 5L) and L360 (pursuant to ISO 3183) of the operations of the Tube Mill of TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, a.s. The goal of the experimental controlled temperature rolling was to achieve the structure refinement, a slight increase in the strength characteristics after subsequent normalization annealing and cooling by spraying seamless tubes at wall thicknesses above 30mm pursuant to the API spec. 5L, ISO 3183, as well as EN 10208. It has been shown that laboratory rolling on rolling two-high mills with calibrated cylindrical surfaces on flat wall patterns of 6.3 - 10-20 - 30 - 40 mm and rolling of tubes on pilgrim stand with a diameter of 273 mm and the wall thickness of 10 - 20 - 30 - 40 - 50 - 60 mm. Rolling took place under a different temperature mode (a conventional mode in the temperature range of 850 - 960°C). For the laboratory experiments, phase transition temperatures were determined using the Gleeble 3800 dilatometric plastometer module. The experiment results have shown the effect of a reduced finishing temperature on the microstructure refinement. The grain size was refined with $G = 9 - 10$ when rolling at lower temperatures compared to $G = 7 - 8$ for conventional rolling. As the fundamental finding, the rolling temperature reduction did not lead to an obvious increase in yield strength or the strength after normalization annealing. This findings led to the decision to create a technical design and implement a functional prototype for the controlled pipe cooling after normalization to achieve a suitable structure, increased strength characteristics with no or minimal impact on the brittle fracture material properties, in the wall thickness centre.

Key words: microalloyed steels; Line Pipe steels; controlled cooling of pipes

Na vlastnosti oceli a ocelových výrobků jsou kladeny neustále se zvyšující nároky, a to i v době využívání progresivních neželezných slitin a kompozitních materiálů. Výroba bezešvých trubek válcovaných za tepla na zastaralých, energeticky náročných tratích typu Mannesmann a Stiefel patří v porovnání s válcováním drátu, pásů nebo profilů na moderních vysokokapacitních tratích mezi finančně nákladná odvětví v oboru tváření materiálů.

Nové technologické trendy v tváření a tepelném zpracování spočívají ve zvýšení kvality materiálu a efektivity jeho výroby. To platí, jak pro oceli s vyšší přidanou hodnotou (oceli určené k zušlechtní), tak i pro konstrukční oceli používané ve strojírenství, energetice, stavebním, petrochemickém nebo plynárenském průmyslu.

Konstrukční oceli jsou v současnosti nosným produktem provozu Válcovna trub TRINECKÝCH ŽELEZÁREN, a. s. (dále jen VT) a tvoří cca 67 % z celkové produkce tohoto provozu. Oceli skupiny C jsou vyráběny v konvertorové ocelárně a jejich normované chemické složení udává tab. 1. Podle zvyklostí výrobce se označují jako ocel CMODV (ocel mikrolegovaná V), popř. ocel CMODNb (ocel mikrolegovaná Nb), obě s přídavkem N. Základ jejich chemického složení spočívá ve vhodné kombinaci mikrolegujících prvků, která vede k:

- substitučnímu nebo intersticiálnímu zpevnění feritu,
- zjemnění zrna a zablokování růstu austenitického zrna při opětovném ohřevu trubek po válcování na poutnické stolici a před samotnou kalibrací,
- procesu vytvrzování precipitací nitridů a karbidů typu V(CN), VN, VC nebo CrC6 [1 – 3].

Tab. 1 Norma pro chemické složení zkoumaných ocelí (hm. %)

Tab. 1 Standard for chemical composition of the investigated steels (wt. %)

Ocel	C	Mn	Si	Al	Cr	V	Nb	N
Ocel CMODV	0,17-0,18	1,00-1,25	0,17-0,23	0,020-0,050	0,16-0,21	0,020-0,060	–	0,0070-0,0120
Ocel CMODNb	0,14-0,18	1,00-1,25	0,17-0,23	0,020-0,050	0,16-0,21	–	0,020-0,050	0,0070-0,0120

U trubkových ocelí s uvedeným chemickým složením se používá označení E355, P355, S355 dle evropských norem EN (případně norem DIN) s různými přívlastky dle účelu použití. Do této skupiny patří oceli Line Pipe s využitím pro rozvody médií v petrochemickém a plynárenském průmyslu, jako např. X52 (dle normy API spec. 5L) a L360 (dle norem ISO 3183, EN 10208). Tyto oceli jsou dodávány ve dvou základních úrovních, a to PSL 1 a PSL 2.

Úroveň PSL 1 zajišťuje normovanou úroveň kvality pro potrubí. Úroveň PSL 2 má dodatečné povinné požadavky na chemické složení, vrubovou houževnatost, pevnostní vlastnosti a dodatečné požadavky na NDT kontrolu. Požadavky, které nejsou označeny specifickou PSL, platí pro obě úrovně (PSL 1 i PSL 2). V případě ostatních, výše uvedených požadavků se používá označení PSL 1 nebo PSL 2. Způsob dodání je rovněž u těchto ocelí pro bezešvé trubky specifikován. Pro označení PSL 1 se uvádí dodávka ve stavu: válcováno; normalizačně válcováno; termomechanicky válcováno; normalizačně žháno; normalizačně žháno a popouštěno; kaleno a popouštěno bez přípony označující daný stav. U ocelí pro označení PSL 2 se užívá označení:

- pro stav válcovaný R,
- pro stav normalizačně válcováno, normalizačně tvářeno, normalizačně žháno nebo normalizačně žháno a popouštěno N,
- pro stav kaleno a popouštěno Q,
- pro stav termomechanicky válcováno nebo obecně termomechanicky tvářeno M [4].

Ve VT jsou trubky vyráběny v obou úrovních označení PSL 1 a PSL 2, avšak v současnosti nikoliv pro použití v kyselém prostředí pod označením H (odolnost materiálu v sirovořivkovém prostředí).

Rozbor stávající provozní technologie

Doposud se ve VT nejčastěji používá technologie normalizačního žhání v krokové peci na trati Velký Mannesmann a Malý Mannesmann (dále jen VM a MM) s řízeným ochlazením ve sprchách po kalibraci bezešvých trubek (obr. 1). U sprchového zařízení prozatím není možná změna tlaku a množství ochlazovací vody. Tato technologie nedosahuje trvale stabilních hodnot meze kluzu pro již zmiňované značky oceli Line Pipe, a to především u trubek s tloušťkou stěny nad 30 mm a s vnějším průměrem nad 273 mm.



Obr. 1 Řízené ochlazení bezešvých trubek na trati Velký Mannesmann

Fig. 1 Controlled cooling of seamless tubes on the Big Mannesmann rolling mill

Problém s nedostatečným dosahováním požadavků norem tkví v těchto třech aspektech:

- Požadavky na vícenásobnou certifikaci kladou na výrobce zvýšené nároky při dodržení širšího rozsahu pevnostních charakteristik současně podle více norem, a to vždy pro daný výrobek v příslušném rozměrovém rozsahu (např. mez kluzu pro S355 / E355 / P355 / X52 / L360).
- Existuje odlišnost přístupu ke stanoveným rozmezím požadovaných pevnostních hodnot podle jednotlivých norem s ohledem na tloušťku stěny bezešvé trubky (tab. 2).

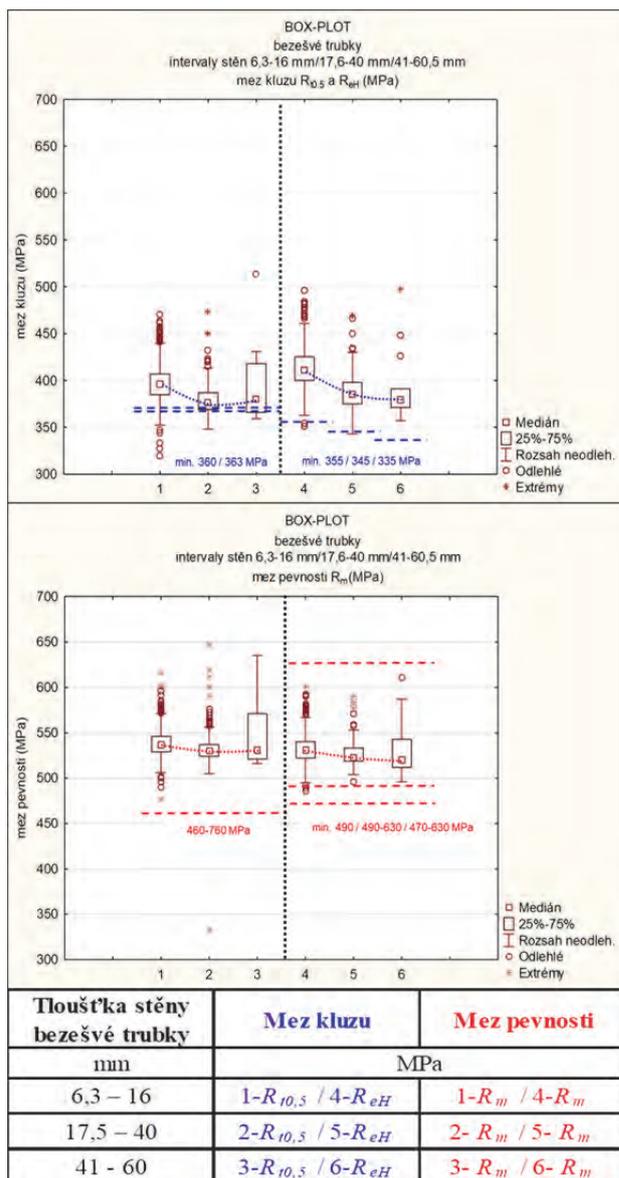
Tab. 2 Požadavky na dosažení hodnot meze kluzu R_e (MPa) dle příslušných norem

Tab. 2 Requirements for achievement of yield strength values R_e (MPa) according to the applicable standards

Tloušťka stěny bezešvé trubky	Norma	
	API spec. 5L / ISO 3183	EN 10297 / EN 10216 / E10210
(mm)	Typ meze kluzu	
	$R_{10,5}$	R_{eH} nebo $R_{p0,2}$
	(MPa)	
6,3 – 16	360 – 530/350 – 510	min. 355
17,5 – 40		min. 345
41 – 60		min. 335

Požadavky na způsob odběru těles pro tahovou zkoušku jsou odlišné. Pravidla pro tahovou zkoušku oceli X52 a L360 se řídí normou ASTM A370 a platí, že osa kruhového zkušebního tělesa pro zkoušku tahem musí být ve středu tloušťky stěny t (vzdálenost $t/2$). U ostatních jmenovaných značek konstrukčních trubkových ocelí musí být osa kruhového zkušebního tělesa pro zkoušku tahem dle EN ISO 377 ve vzdálenosti $t/4$ od vnějšího povrchu trubky. To platí pro podélný i příčný směr zkušebních těles kruhového průřezu.

Z porovnání meze kluzu dle metodiky zkoušení ASTM A370 a EN ISO 377 u trubek vyrobených na VM (obr. 2), které byly stanoveny dle požadavků příslušných norem, že především v intervalech tloušťky stěny 17,5 – 40 a 41 – 60,5 mm (BOX-PLOT skupiny 2 a 3) jsou hodnoty $R_{10,5}$ nevyhovující, což představuje cca 10 % z celkového počtu zkoušek. Takto postiženy jsou především stěny trubek 30 mm a výše. Naopak u R_{eH} jsou výsledky pozitivní. Je zde patrný i pokles hodnot pevnostních parametrů s rostoucí tloušťkou stěny, a to výrazněji u zkoušení dle EN ISO 377 než dle ASTM A370. Na to reagují normy přípustností poklesu předepsaného minima meze kluzu. Mez pevnosti dosahuje vyhovujících hodnot shodně v obou variantách napříč celou škálou tloušťky stěn. Rozsah statisticky hodnoceného datového souboru N pro jednotlivé intervaly tloušťky stěn se pohybuje mezi 450 až 1336 zkouškami a zahrnuje vybrané údaje z období let 2015 – 2017 (zdroj: werkportal/VT/Zkušební listy).



Obr. 2 Srovnání dosahované úrovně meze kluzu dle typu (nahore) a meze pevnosti dle typu (dole) pomocí BOX-PLOT (STATISTICA-StatSoft)

Fig. 2 Comparison of achieved yield point level by the type (above) and tensile strength by the type (below) with the use of the BOX-PLOT (STATISTICA-StatSoft)

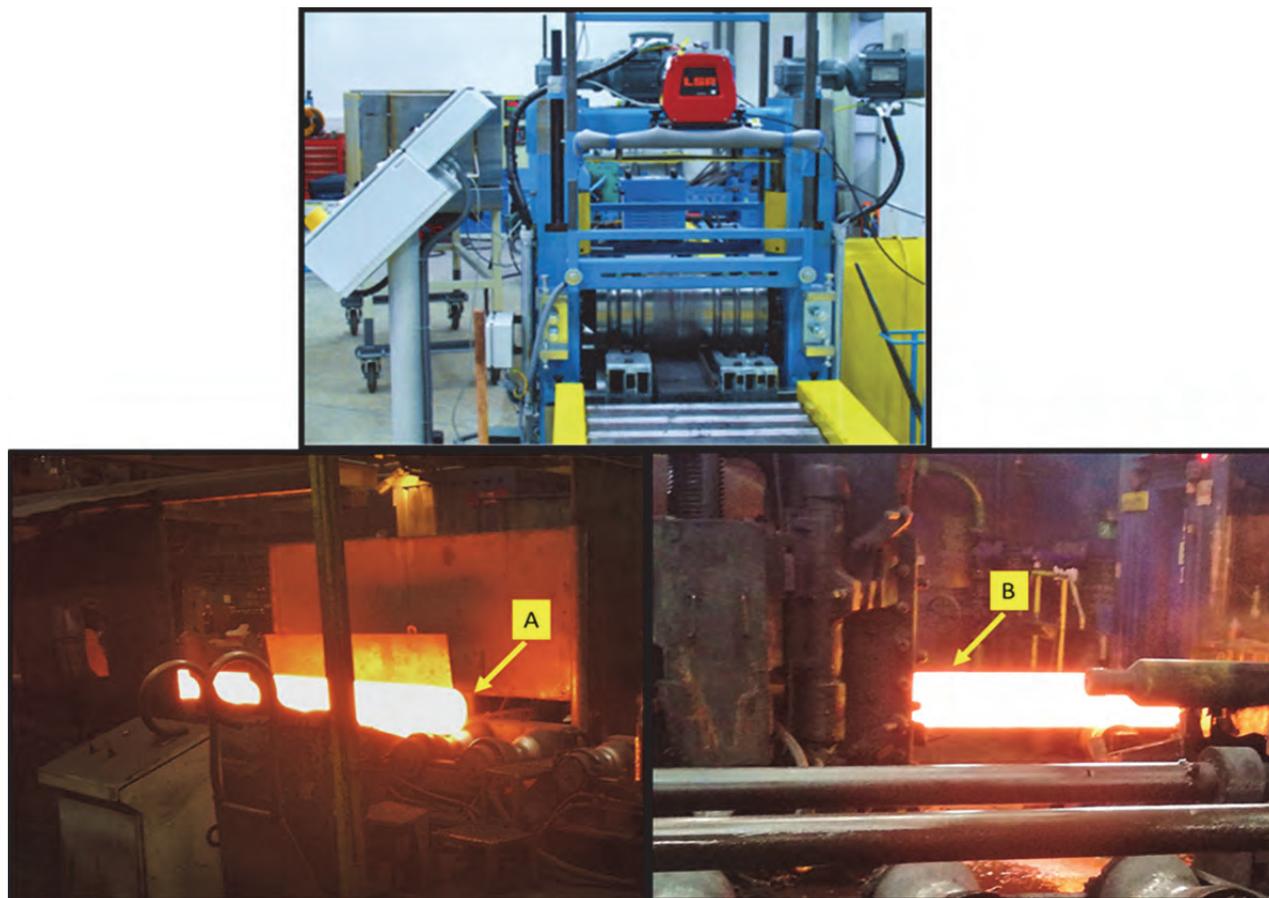
Experimentální práce

Pro zlepšení plnění požadavků na pevnostní charakteristiky výše zmiňovaného rozměrového sortimentu bylo v rámci interního výzkumného projektu provedeno experimentální teplotně řízené válcování a ochlazování, a to:

- na laboratorní válcovací stolici duo s kalibrovanými válci pro tváření kruhových tyčí, kde speciální stůl s armaturami za hladkou částí pracovních válců umožňuje simulovat válcování bezešvých trubek; simulace byla provedena na vzorcích tloušťky stěny 6,3 – 10 – 20 – 30 – 40 mm (obr. 3 nahore),

b) na provozní poutnické stolici tratě VM v provozu VT, kde byly válcovány trubky o průměru 273 mm a

tloušťky stěny 10 – 20 – 30 – 40 – 50 – 60 mm (obr. 3 dole).



Obr. 3 Nahore: Válcovací stolice s válci určenými pro tváření kruhových tyčí v Ústavu modelování a řízení tvářecích procesů VŠB-Technická univerzita Ostrava

Dole: Vyběhová strana děrovací stolice VM s měřením teploty v místě A a vstupní strana poutnické válcovací stolice VM s měřením teploty v místě B v provozu VT

Fig. 3 Above: Rolling mill with cylinders designed for forming of round bars in the Institute of modelling and control of forming processes at the VŠB-Technical University of Ostrava

Below: Outlet side of the pilgrim mill VM with measuring of temperature in the place A and inlet side of pilgrim mill VM with measuring of temperature in place B in production mill VT

Po tomto válcování v obou případech bylo zařazeno normalizační žhání a řízené ochlazování pod sprchami. Průběh každého experimentu na laboratorní stolici byl řízen povrchovou teplotou provalku měřenou těsně před stolicí i za stolicí dvojicí teplotních skenerů Landscan. V provozní praxi na VM bylo válcování řízeno pomocí dosažené povrchové teploty vyděrovaného předvalku v hlavové části předvalku za děrovací stolicí a na povrchu vyděrovaného předvalku před vstupem do poutnické stolice (stacionární pyrometr a přenosný pyrometr). Povrchová teplota jak vzorku pro řízené válcování v laboratorní stolici, tak i kruhových děrovaných předvalků pro válcování před vstupem do poutnické stolice se pohybovala mezi 830 a 960 °C. Ve srovnání s tím jsou běžně užívané povrchové teploty provozního doválcování před poutnickou stolicí v rozmezí 1050 – 1100 °C.

Cílem válcování bylo zjemnění struktury a zároveň mírné zvýšení pevnostních charakteristik po následném normalizačním žhání a kalibraci. U laboratorních

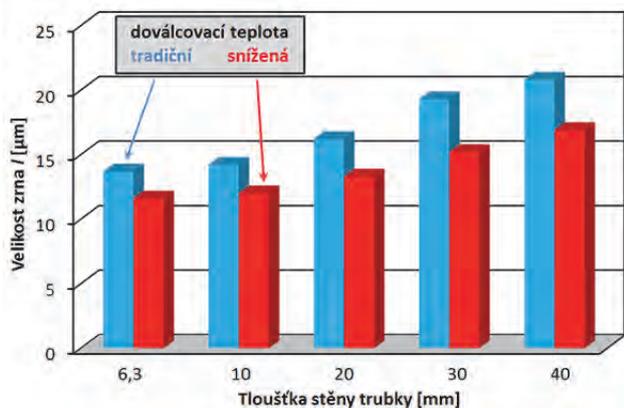
experimentů byly stanoveny i teploty fázových přeměn pomocí dilatometrického modulu plastometru Gleeble 3800 a to po tříminutové austenitizaci na teplotě 950 °C a při rychlostech ochlazování 0,2 a 0,7 °C·s⁻¹.

U laboratorního válcování byly zvoleny snížené teploty posledních dvou úběřů simulujících válcování na poutnické stolici, a to na základě výsledků dilatometrických experimentů. Byly použity dva typy konstrukčních ocelí: ocel A a ocel C (ocel CMODV).

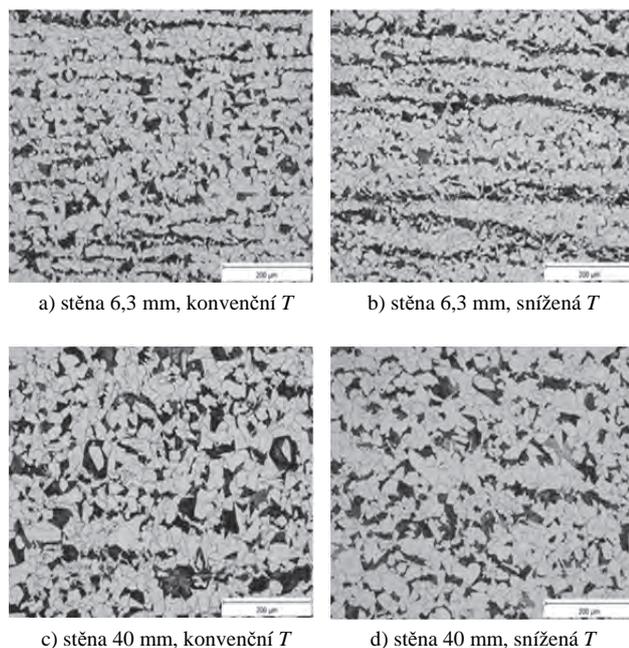
Diskuse výsledků

U laboratorních experimentů pro všechny tloušťky stěny bylo zaznamenáno relativní zjemnění mikrostruktury snížením doválcovací teploty oproti tradičním doválcovacím teplotám (obr. 4). Z hlediska predikce strukturotvorných procesů při ochlazování z doválcovací teploty lze předpokládat, že jemnější výsledné zrno je

u mikrolegované oceli C dosahováno brzdícím účinkem jemných částic (nejspíše karbonitridů vanadu, precipitujících zřejmě až při teplotách pod 800 °C) na růst zrna v průběhu ochlazování hotového vývalku [5]. Struktura konečné fáze byla převážně feriticko-perlitická (obr. 5).



Obr. 4 Vliv doválcovací teploty T_{dov} a tloušťky stěny simulované trubky na velikost výsledného zrna
Fig. 4 The effect of finishing temperature T_{dov} and wall thickness of the simulated tube on the final grain size



Obr. 5 Mikrostruktura vývalku z oceli C dle laboratorních doválcovacích teplot a tloušťky stěny
Fig. 5 The microstructure of a C-steel rolled product as a function of laboratory rolling temperatures and wall thickness

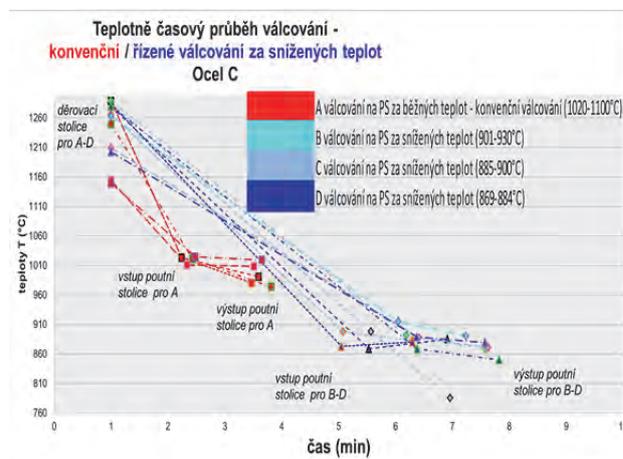
Výsledky dilatometricky určené teploty fázových přeměn pro jednotlivé rychlosti ochlazování shrnuje tab. 3.

Tab. 3 Dilatometricky určené teploty fázových přeměn
Tab. 3 Dilatometrically determined phase transformation temperatures

Rychlost ochlazování (°C·s ⁻¹)	A_{r3}	A_{r1}
	(°C)	
0,2	814	657
0,7	793	636
0,2	793	628
0,7	767	616

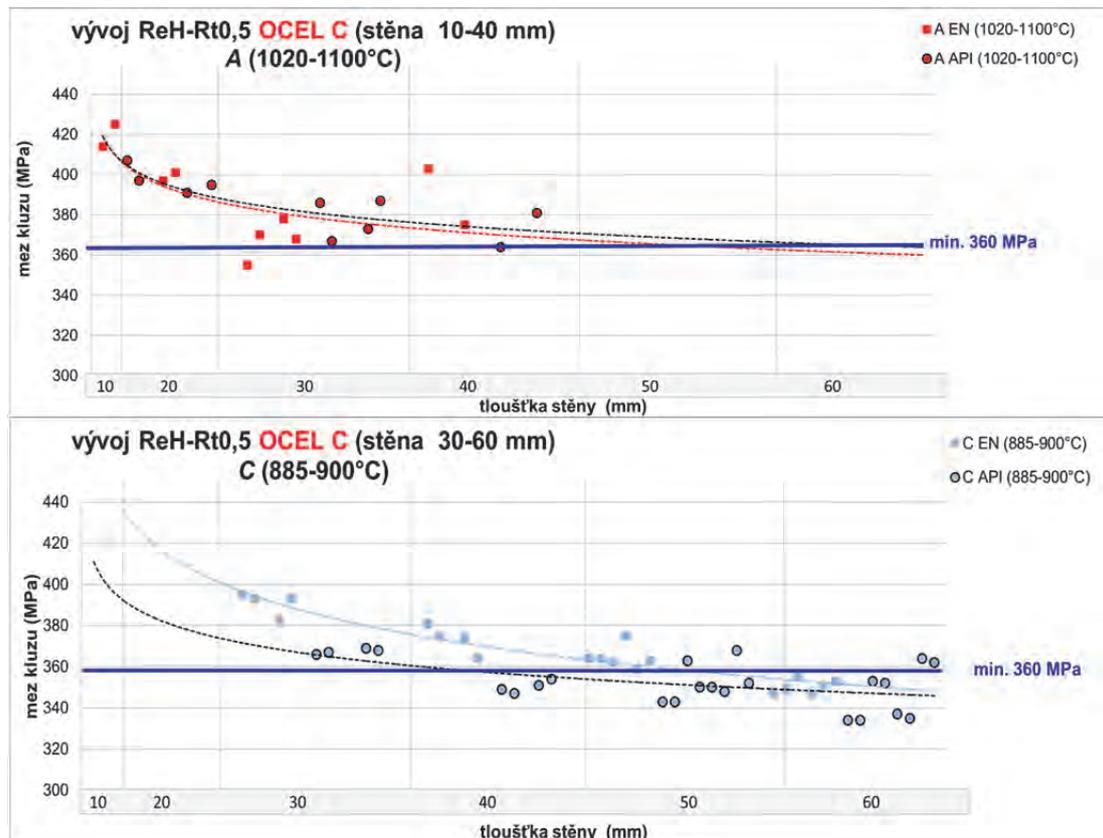
Pevnostní vlastnosti obou ocelí vcelku mírně klesají s rostoucí tloušťkou stěny simulované trubky. Nedá se jednoznačně říci, že by snížení doválcovacích teplot vedlo k evidentnímu zvýšení meze kluzu či pevnosti.

Z teplotně časového průběhu válcování na poutnické stolici tratě VM (obr. 6) a z podobnosti dosažených výsledků teplotního obrazu u termočlánkového měření po průřezu stěny části předvalku po normalizačním ohřevu lze usuzovat na stále vyšší teploty předvalku ve středu tloušťky stěny před poutnickou stolicí. Toto zjištění pak v kombinaci se zařazením následného normalizačního ohřevu v traťové krokové peci před kalibrací a řízeným ochlazováním trubek dává předpoklad tvorby nehomogenity struktury z hlediska velikosti zrna po průřezu stěny trubky.



Obr. 6 Teplotně časový průběh válcování na poutnické stolici
Fig. 6 Temperature-time course of rolling on pilger mill

U trubek po válcování byly provedeny tahové zkoušky dle metodiky ASTM A370 a EN ISO 377. Z grafů na obr. 7 je patrné, že mez kluzu u trubek s tloušťkou stěny nad 30 mm nedosahuje požadované úrovně.



Obr. 7 Ukázka výsledků Rt0.5 a ReH u tahových zkoušek dle tloušťky stěny pro oceli C

Fig. 7 Example of tensile test results (for Rt0.5 and ReH) for different wall thickness for carbon steels

Závěr

Bylo provedeno laboratorní válcování na válcovací stolici duo s kalibrovánými válci na plochých vzorcích tloušťky stěny 6,3 – 10 – 20 – 30 – 40 mm a provozní válcování trubek na poutnické stolici trubky o průměru 273 mm a tloušťky stěny 10 – 20 – 30 – 40 – 50 – 60 mm. Válcování probíhalo za různého teplotního režimu (konvenční režim v teplotním rozmezí 1050 – 1100 °C a režim řízeného válcování v teplotním rozmezí 830 – 960 °C). U laboratorních experimentů byly stanoveny i teploty fázových přeměn pomocí dilatometrického modulu plastometru Gleeble 3800, a to po tříminutové austenitizaci na teplotě 950 °C a při rychlosti ochlazování 0,2 a 0,7 °C·s⁻¹.

Došlo ke zjemnění zrna s hodnotami $G = 9 - 10$ při válcování za nižších teplot oproti hodnotám $G = 7 - 8$ u konvenčního způsobu válcování bez snížených teplot.

Zásadním zjištěním bylo, že snížení doválcovacích teplot nevede k evidentnímu zvýšení meze kluzu či pevnosti po normalizačním žihání.

Z pohledu zatížení válcovací stolice a opotřebených válců při válcování trubek s většími rozměry je přínos této technologie vzhledem k možným dodatečným nákladům na údržbu zařízení nulový.

S využitím teoretických poznatků v tvorbě mikrostruktury zaručující zvýšení pevnostních vlastností, praktických výsledků laboratorních zkoušek při simulaci tváření a ochlazování a numerického modelování fázových transformací bylo přistoupeno k návrhu a realizaci provozního zařízení pro transformaci struktury s tvorbou acikulárního feritu s žádným nebo minimálním dopadem na křehkolomové vlastnosti materiálu. Tato technologie má zvýšit pevnostní parametry ve středu tloušťky stěny bezešvých trubek.

Literatura

- [1] TUROŇ, R., DÄNEMARK, J., TUROŇOVÁ, P. Materiálově-technologický pohled na výrobu a zpracování bezešvých trubek pro zvláštní aplikace. *Hutnické listy*, 64 (2011) 4, 54–57.
- [2] PICKERING, F. B. The Formation of Sigma in Austenitic-Stainless steels, Precipitation Processes in Steel. *Iron and Steel Institute, Special Report 64* (1958) 118–124.
- [3] PAN, T., CHAI, X., SU, H., YANG, C. Precipitation Behavior of V-N Microalloyed Steel at Normalizing Process. In *Tools for Materials Science & Technology*, MS&T Pittsburgh, USA, Wiley-TMS, 1. ed., 12.-16. Oct. 2014.
- [4] API Specification 5L, 46. vyd., účinnost: 1.11.2018, Errata 1, květen 2018, 9 a 26.
- [5] SCHINDLER, I., RUSZ, S., KAWULOK, R., KAWULOK, P., OPĚLA, P. aj. *Laboratorní válcování oceli S235J2H a S355J2H simulující řízené válcování trubek. (Závěrečná zpráva ke smlouvě o dílo HS 6061556) Ostrava: VŠB-TU Ostrava, FMMI, září 2015, s. 37.*