



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
MATERIÁLOVOTECHNOLOGICKÁ FAKULTA V TRNAVE

Ing. Ján Turňa

Autoreferát dizertačnej práce

**Výskum procesu valcovania rúr pre energetický priemysel v podmienkach Železiarní
Podbrezová**

na získanie akademického titulu doktor „philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“

v doktorandskom študijnom programe: Strojárske technológie a materiály

v študijnom odbore: 5.2.7. strojárske technológie a materiály

Forma štúdia: externá forma

Miesto a dátum: Trnava, 31. máj 2021



Dizertačná práca bola vypracovaná na Slovenskej technickej univerzite Materiálovotechnologickej fakulte so sídlom v Trnave

Predkladateľ: Ing. Ján Turňa
ŽP VVC s.r.o.
Kolkáreň 35
976 81 Podbrezová

Školiteľ: doc. Ing. Jozef Bilík, PhD.
Ústav výrobných technológií
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave,
Slovenská Technická Univerzita v Bratislave
Jána Bottu 2781/25
917 24 Trnava

Oponenti:

Autoreferát bol rozoslaný:

**Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa oh.
na Materiálovotechnologickej fakulte STU so sídlom v Trnave, Jána Bottu 2781/25, 917 24
Trnava**

.....
prof. Ing. Miloš Čambál, CSc.
dekan MTF STU

OBSAH

ÚVOD	4
1 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE	5
2 METODIKA EXPERIMENTOV	6
3 EXPERIMENTÁLNY PROGRAM.....	13
3.1 Konceptia valcovania rúr vo výrobnom programe ŽP a.s.	13
3.2 Povrchová teplota materiálu.....	14
3.3 Analýza vrubovej húževnatosti	16
3.4 Povrchová teplota valca	18
3.5 Analýza vplyvu chladenia valcov	22
3.5.1 Rozloženie tlaku dopadajúcej vody	24
3.5.2 Porovnanie prietokov a tlakov dýz	26
3.6 Numerická simulácia valcovania rúr	27
3.6.1 Výsledky simulácií	29
3.6.2 Simulácia valcovacej kampane	30
4 ZÁVERY A DISKUSIA	33
5 PRÍNOSY DIZERTAČNEJ PRÁCE PRE VEDU, PRAX A PEDAGOGIKU	37
5.1 Prínosy dizertačne práce pre prax	37
5.2 Prínosy dizertačne práce pre vedu	37
5.3 Prínosy dizertačne práce pre pedagogiku	38
ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV	39
PUBLIKAČNÁ ČINNOSŤ.....	42

ÚVOD

Prezentovaná práca „Výskum procesu valcovania rúr pre energetický priemysel v podmienkach Železiarní Podbrezová a.s.“ bola navrhnutá ako súčasť internej výskumnej úlohy s názvom HotFormTech (Mikroštruktúrna koncepcia, technologické inovácie a riadenie výroby valcovaných rúr).

Výroba valcovaných rúr v podmienkach ŽP a.s. sa realizuje prostredníctvom termicko-deformačného spracovania polotovaru vo forme kontiodliatkov štvorcového prierezu s predpísanou geometriou. Vlastný výrobný proces na valcovacej trati ŽP a.s. je možné rozdeliť na prípravné poradie a hotovné poradie. Do prípravného poradia zaradujeme tú časť technológie výroby, ktorá začína ohrevom blokov v karuselovej peci a končí výrobou lupy predpísanej geometrie pred jej vstupom do krokovej pece. Hotovné poradie je reprezentované ohrevom lupy v krokovej peci a realizáciou termo-mechanického spracovania v jednotlivých stojanoch ťahovej redukovne. Z fyzikálno-metalurgického hľadiska sú tu rozhodujúce teploty, deformácie a rýchlosti deformácie v jednotlivých stojanoch redukovne. Vo väčšine prípadov je rozhodujúce zabezpečiť, aby celý proces valcovania prebehol v austenite, t. j. dovalcovacie teploty boli nad teplotou Ar₃.

V ŽP a.s. sa na prevádzke valcovňa rúr vyrábajú rúry vo výrobnom procese za tepla, kedy prechádzajú viacerými technologickými uzlami, ktorými sú dierovanie, elongovanie, pretlačovanie, odvalcovanie, reohrev a redukovanie. Z ekonomického a výrobného hľadiska záleží na spôsobe technologického procesu, vzhľadom na ich výsledné vlastnosti a kvalitu prechodom valcovacou traťou valcovne rúr v ŽP a.s.

Štruktúra dizertačnej práce je rozdelená na stručný úvod do problematiky valcovania bezšvíkových rúr. V teoretickej časti je popísané valcovanie podľa Erharta v podmienkach ŽP a.s. V kapitole 4 práce sú navrhnuté ciele práce, ktoré boli, resp. budú, realizované pomocou navrhovaných metodík a metód experimentov.

V kapitole 5 sú popísané metodiky použité počas vstupných experimentov v rámci valcovania bezšvíkových rúr, ako aj systém chladenia valcov, simulácia valcovania a realizácia mikroštruktúrnych analýz vybraných stavov.

V kapitole 7 sú sformulované závery, ktoré sa týkajú technologického procesu valcovania, chladenia a merania povrchovej teploty.

1 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

V práci boli stanovené nasledujúce ciele:

- analyzovať súčasný stav valcovaného sortimentu valcovne rúr ŽP a.s.,
- stanoviť parametre termo-mechanického spracovania rúr vo vzťahu k dodržaniu dovalcovacej teploty vzhľadom na teplotu transformačnej premeny (A_{r3}),
- analyzovať vplyv chladenia valcov, percentuálny výkon chladiaceho systému a dovalcovaciu teplotu na výslednú mikroštruktúru pri dodržaní resp. zvýšení životnosti valcov,
- realizácia valcovania vybraných akostí a zavedenie matematizácie pri súbežnom sledovaní deformácie, rýchlosti deformácie v jednotlivých stojanoch ťahovej redukovne, priebežné sledovanie teploty valcov a valcovanej rúry vo väzbe na fázovú premenu austenitu, ktorý sa premieta do výslednej mikroštruktúry a mechanických vlastností,
- výskum procesu výroby rúr cez technické a technologické nastavenie ťahovej redukovne až po podporu počítačových simulácií cez použitie stanovených parametrov do procesu modelovania redukovania rúr.

2 METODIKA EXPERIMENTOV

Stanovenie povrchovej teploty lupy

V súčasnosti je možné v termo-mechanickom procese riadiť deformáciu a rýchlosť deformácie, pričom v ideálnom prípade by boli známe hodnoty teploty – T_i , deformácie – ε_i , stupňa deformácie – $\dot{\varepsilon}_i$ v každom i-tom stojane.

Z pohľadu stanovenia teplôt v prevádzke sú známe len hodnoty pri výstupe z krokovej pece a dovalcovacia, ktorá je zaznamenávaná len pri výstupe z ťahovej redukovne. Bolo by potrebné poznať resp. predikovať priebeh teplôt od vstupu až po výstup. Momentálne hodnota teploty dovalcovania definuje len to či bola nad alebo pod transformačnou premenou. To však nie je postačujúce z dôvodu poznania, kedy resp. v ktorom stojane k podkročeniu transformačnej teploty. V nadväznosti na riadený proces chladenia valcov je potreba poznať aj teploty lupy vo všetkých stojanoch a to z dôvodu vytvorenia predpokladov na riadenie a kontrolu.

Meranie teploty lupy bolo realizované termokamerou za ostrekom okují pred vstupom do ťahovej redukovne. Pri použití termokamery je možné zanedbať vplyv na vzdialenosť a uhol merania voči meranému objektu v porovnaní s pyrometrami. [1].

Mikroštruktúrna analýza

Vzorky na mikroštruktúrnú analýzu boli pozorované svetelným mikroskopom pri 200-násobnom zväčšení. Hodnotenie veľkosti zrna prebiehalo podľa normy ASTM E112, ktorá popisuje postup merania a spôsob na stanovenie priemernej veľkosti zrna v kovových materiáloch [2]. Meranie bolo realizované pomocou softvéru AnalySIS Inclusion Inspector, ktorý pracuje na princípe označovania pretátných hraníc zrn. [3]

Analýza vrubovej húževnatosti

Pre zistenie správania sa materiálu pri náhlom zvýšení namáhania bola vykonaná rázová skúška v ohybe, ktorej výsledkom je aj hodnota nárazovej práce. Skúška spočívala v prerazení skúšobnej vzorky, do ktorej stredu bol mechanicky umiestnený vrub. Vrubovú húževnatosť je možné definovať ako absorbovanú energiu na plastickú deformáciu materiálu. Pri tejto skúške sa absorbovaná práca vyjadruje v jouloch, ktorá je považovaná za mieru odolnosti materiálu proti rázovému namáhaniu [4].

Kontaktné meranie povrchovej teploty na profile valca

Pre zistenie hodnoty povrchovej teploty bolo potrebné navrhnuť vhodnú metodiku merania a zvoliť adekvátne zariadenie. Práve preto bola navrhnutá a vyrobená prototypová pásková sonda s termočlánkom typu K.

Zariadenie a metodika boli overené systematickými meraniami, pričom sa už od začiatku ukazovali ako veľmi spoľahlivé. Nastavená metodika umožňovala realizovať veľmi presné meranie pri vypnutom pohone ťahovej redukovne a odstavenej chladiacej vode. Pre ešte vyššiu spoľahlivosť experimentálneho merania boli nastavené podmienky, ktoré bolo nutné dodržať. Je ich možné definovať nasledujúcimi bodmi [1]:

- poloha TC snímacieho člena pozdĺžne v strede kalibra (obr. 1),
- kolmá orientácia sondy k dotykovej rovine v strede kalibra,
- minimalizácia uhlovej rýchlosti sondy voči kontaktnému bodu na povrchu kalibra,
- udržanie sondy min. 5 sekúnd v polohe podľa hore uvedených podmienok.



Obr. 1 Typické miesto merania pomocou TC sondy OMEGA – stred kalibra valca

Modifikáciou merania pre všetky rozmery kalibrov bol navrhnutý a vyrobený špeciálny prípravok na uchytenie prototypovej sondy (obr. 2), ktorý pomocou permanentného magnetu udržoval sondu v presne definovanej polohe.



Obr. 2 Prototypové zariadenie pre meranie povrchovej teploty kalibra

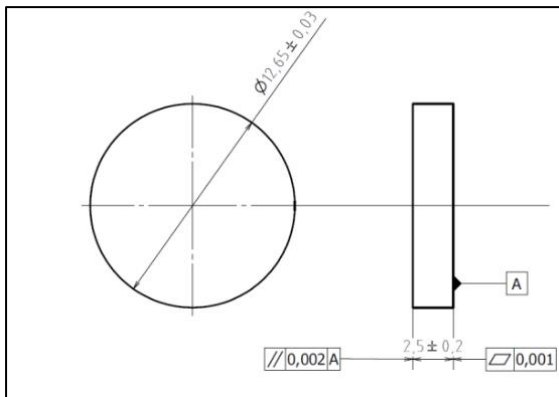
Termofyzikálne vlastnosti valca

Pre posúdenie vplyvu teploty na životnosť a opotrebenie bola znalosť koeficientu tepelnej i teplotnej vodivosti. Tieto údaje sú dôležitým predpokladom aj pre štúdium priestorového a časového rozloženia teplotného poľa vo valci. Preto bolo realizovaná identifikácia uvedených vlastností na vyradenom pracovnom valci.

Experiment bol realizovaný v Laboratóriu prenosu tepla a prúdenia na zariadení FlashLine (obr. 3), ktoré je určené pre identifikáciu termofyzikálnych vlastností materiálov od 20 °C až do 1600 °C. Pre uvedené meranie bola použitá vzorka s priemerom 12,7 mm s hrúbkou 1,5 ÷ 6 mm (obr. 4 a obr. 5). Na vzorky bola nanesená tenká grafitová vrstva s definovanou emisivitou.



Obr. 3 Zariadenie pre meranie termofyzikálnych vlastností FlashLine 4010



Obr. 4 Schéma vzorky



Obr. 5 Vzorka ošetrená grafitovým povlakom a umiestnená v molybdénovom krúžku

Termofyzikálne vlastnosti boli identifikované v rozsahu teplôt $25 \div 400$ °C. Miesto odberu vzorky zo stredu valca je zobrazené na obr. 6.



Obr. 6 Pracovný valec a miesto odobraných vzoriek

Stanovenie koeficientu prestupu tepla na povrchu valca

Koeficient prestupu tepla bolo dôležité poznať hlavne z dôvodu kvantifikácie objemu energie potrebnej na ohrev resp. chladenie objektov (napr. ohrev materiálu, chladenie nástrojov a pod.).

Laboratórny experiment bol navrhnutý s cieľom porovnania účinnosti chladenia rôznych typov dýz pri nominálnom tlaku 5 bar. Pre realizáciu experimentu bolo použité zariadenie „Malý valec“ (obr. 7) na pracovisku Laboratória prestupu tepla a prúdenia. Zariadenia sa skladá z nerezovej rúry o priemere 350 mm a dĺžke 520 mm, ktorá je osadená segmentom so 6 termočlánkami. Napriek tomu, že sa nejednalo o profilový valec, meranie umožňuje vzájomné porovnanie chladiacich účinkov v oblasti osi dýz [5] [6] [7].



Obr. 7 Zariadenie pre meranie HTC povrchu valca

Valec, v ktorom sú zabudované teplotné snímače bol pri každom experimente zahriaty na teplotu 280 °C. Taktiež bol sledovaný prietok pri nominálnom tlaku a počas umiestnenia v rôznej vzdialenosti od valca (20 mm, 50 mm, 70 mm). Rôzna vzdialenosť dýzy bola premeraná s rôznou rýchlosťou rotácie valca. Teplota vody počas merania bola konštantná a pohybovala sa od 10 °C do 20 °C. Výsledky merania sú použiteľné aj do numerických simulácií [8].

Numerická simulácia valcovania rúr

V numerickej simulácii boli použité všetky prevádzkové a laboratórne výsledky. Na začiatku prípravy simulácií bolo nutné validovať prestupy tepla do valcov. Pre validáciu bol použitý rozmer rúry priemeru 88,9 mm, ktorý bol valcovaný v nápichovej skupine číslo 1, teda experimentálny rozmer C [9].

Tento rozmer bol vybraný z dôvodu objemu údajov potrebných k simulácii a vzhľadom na náročnosť výpočtu len s použitím 11-tich stojanov. Vďaka ušetrenému výpočtovému času oproti rozmeru (A,B) s väčším počtom stojanov bolo jednoduchšie a rýchlejšie zasahovať do prebiehajúcej simulácie a v prípade potreby upravovať požadované vstupné podmienky pre čo najpresnejšie porovnanie so skutočnosťou.

V rámci realizovaných simulácií sa získalo dostatok údajov pre verifikáciu a validáciu tohto modelu v rôznych numerických softvéroch (napr. Deform 3D, ANSYS a SimRoll). Dôležitým predpokladom bolo poznanie všetkých faktorov, ktoré mali vplyv na termálne zmeny v procese. Medzi najdôležitejšie patria samotné koeficienty prestupov tepla medzi jednotlivými materiálmi ale aj ich termofyzikálne vlastnosti ako tepelná vodivosť, kapacita, emisivita, merné teplo či hustota, ktoré boli zahrnuté do výpočtov.

Vplyv na výslednú teplotu má aj radiácia do okolitého prostredia, ktorá sa stanovuje prostredníctvom koeficientu konvekcie. Pri zahrnutí všetkých získaných údajov bolo nevyhnutné regulovať koeficient HTC medzi rúrou a valcom [10].

Pokles teploty z 960 °C na 806 °C počas valcovania v 11 stojanoch za cca 2,5 sekundy bol veľmi výrazný [8] [11] [12].

3 EXPERIMENTÁLNY PROGRAM

Vzhľadom na kontinuálnosť procesu valcovania za tepla na prevádzkarni Valcovňa rúr v ŽP a.s. bolo plánovanie experimentov veľmi náročné. Preto lepšou voľbou bolo realizovať všetky experimenty počas štandardných výrobných príkazov.

3.1 Konceptia valcovania rúr vo výrobnom programe ŽP a.s.

Cieľom experimentov bola výroba rúr z akosti P235GH počas výrobného programu prevádzkarne Vvr.

Vstupný polotovár bol kontizliatok kvadrátu 205 mm, ktorý sa nadelil na naplánované dĺžky podľa výrobného príkazu. Takto nadelený kontizliatok sa nazýva klátik. Následne prebieha nasadenie materiálu do karuselovej pece. Priemerný čas pobytu vsádzky v peci je 240 minút. Uvedený čas závisí hlavne od akosti materiálu, ktorý je spracovávaný. Klátik vystupuje z pece so strednou povrchovou teplotou 1270 °C v jeho strede čo je riadené systémom, ktorý prepočítava aj teplotu v jeho priereze. Následne postupuje klátik do dierovacieho lisu, kde je vydierovaný s priemerným zaťažením 135 bar (resp. 13,5 MPa čo v skutočnosti je tlak oleja v potrubnom systéme dierovacieho lisu so šiestimi čerpadlami). Klátik po technologickej operácii lisovania sa nazýva výlisok. Následne je výlisok elongovaný, pričom priemerná hodnota zaťaženie elongátora sa pohybuje okolo 2200 A (zaťaženie elongátora sa uvádza v ampéroch z dôvodu sledovania spotreby elektrickej energie, ktorá umožňuje sledovať aj zaťaženie), čím dostaneme vývalok. Po priečnom dopravníku sa dostáva vývalok k pretlačovacej stolici, kde sa pomocou trňovej tyče a stojanov pretlačovacej stolice vytvorí dutý polotovár – lupa. Keď je vývalok rozvalcovaný na trňovej tyči, tak postupuje k odvalcovaciemu zariadeniu, kde sa uvoľní trňová tyč. Z lupy sa následne odreže predný a zadný koniec tzv. uši a dno.

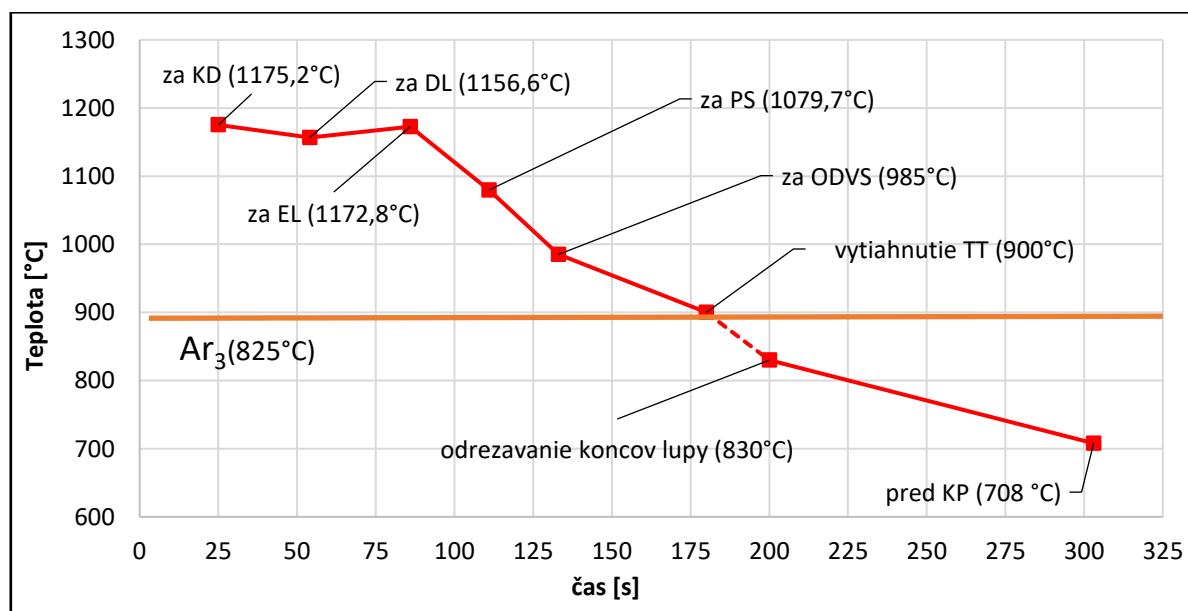
Lupa je dopravená pred krokovú pec, kde sa odmeria pomocou zariadenia hrúbka steny v 9-tich bodoch a následne sa ohrieva na požadovanú teplotu počas priemernej doby 15 min. Po výstupe z krokovej pece je lupa zbavená okují a vstupuje do ťahovej redukovne, kde dostane svoj finálny rozmer rúry.

3.2 Povrchová teplota materiálu

Práca sa zaoberá aj termofyzikálnym významom sledovania povrchových teplôt nielen v procese výroby dutého polotovaru ale aj finálne rúry s cieľom realizovať všetky deformačné procesy v austenite, to znamená nad teplotou A_{r3} [13].

Z fyzikálno-metalurgického ako aj štruktúrneho hľadiska je toto meranie prezentované na obr. 8 a obr. 9, pričom priamo závisí na veľkosti a rýchlosti deformácie v každom technologickom uzle, ktoré vedú k tvorbe deformovaného austenitu. Všetky deformácie realizované boli v austenite. Prípady kedy je teplota tesne nad hranicou A_{r3} sa vyskytuje len pri spracovaní nízkouhlíkových nelegovaných akostí s veľmi malou hrúbkou steny. Z hľadiska veľkosti deformácie sa objavuje aj jej pomerne malá hodnota, ktorá definuje len malú deformáciu v povrchových vrstvách lupy. Toto fyzikálno-metalurgické hľadisko uplatňuje nielen znalosť transformačných teplôt ale aj hodnoty deformačných odporov austenitu. Musí plne rešpektovať reálne podmienky pri výrobe polotovaru a to aj v prípade výskytu heterogenity teplôt po dĺžke valcovaného materiálu ako aj po jeho priereze.

Výstupnú teplotu z karuselovej pece je nutné označiť ako priemernú a to z dôvodu nepriameho merania pomocou pecných termočlánkov. Hlavný vplyv na výstupnú teplotu má ohrievaná akosť materiálu, čo spôsobuje zmenu jej priemernej hodnoty.

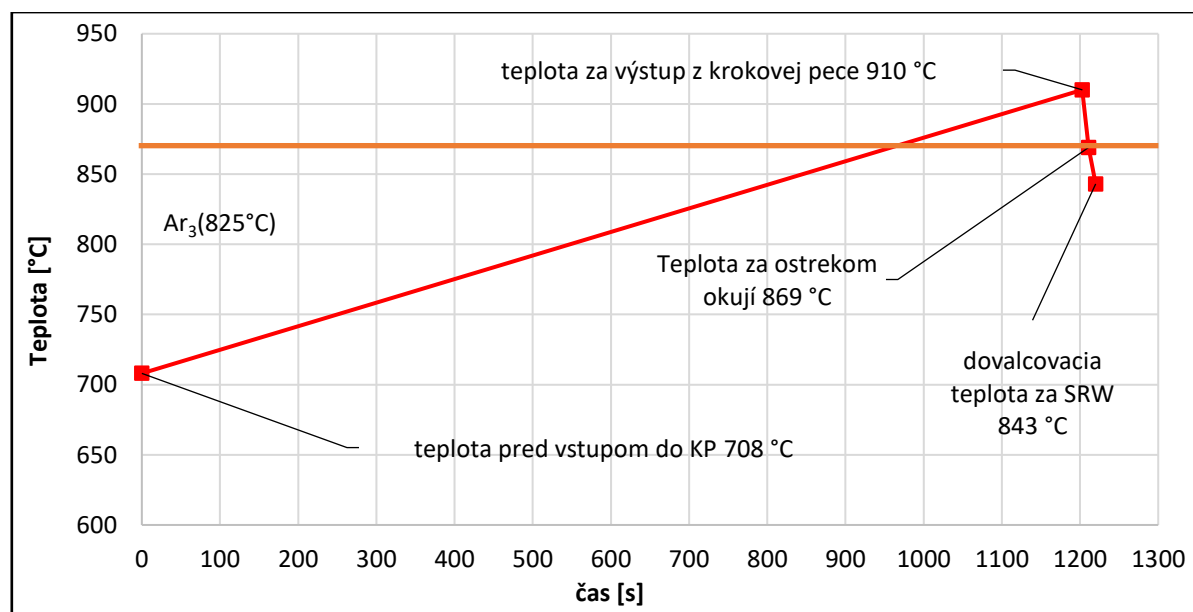


Obr. 8 Závislosť priemerných povrchových teplôt na čase prechodov na trati

Pri akosti materiálu P235GH je priemerná hodnota teploty cca 1230 °C. Za technologickým uzlom EL je možné sledovať mierny nárast teploty, ktorý je spôsobený odstránením

povrchovej vrstvy výlisku vplyvom deformácie ale aj deformačným teplom. Následne vývalok prechádza pretlačovacou stolicou, ktorá z elongovaného výlisku vytvorí dutý kruhový polotovar tzv. lupu, ktorá sa následne navalcuje na trňovú tyč. Počas prechodu vývalku cez PS môže byť valcovaná lupa čiastočne ochladzovaná vodou, čo je spôsobené chladením jej nástrojov. Následne sa TT vytiahne na vyťahovacom stroji. Predný a zadný koniec lupy sa musia orezať na tvrdokovových pílach a následne pokračuje lupa smerom ku krokovej peci. V tejto časti v závislosti od hrúbky steny sa začne lupa ochladzovať alebo aj ohrievať a to až do bodu vstupu do krokovej peci. Tento pokles je možné definovať ako prirodzený odvod tepla do okolia ako aj do dopravníkov. Uvedený technologický priebeh je zobrazený na obr. 8

Na obr. 9 je graficky popísaný ohrev lupy v krokovej peci, následný ostrek okují a valcovanie na finálny rozmer rúry. Rúra sa po vstupe do krokovej pece ohreje na teplotu od $970 \div 1050$ °C. Výsledkom správneho ohrevu je dovalcovacia teplota nad hodnotou transformačnej premeny austenitu a rúra je valcovaná v čistom austenite.



Obr. 9 Závislosť priemerných povrchových teplôt na čase prechodov od KP po výstup z SRW

Z grafického zobrazenia na obr. 8 a obr. 9 je možné definovať presnú dobu, ktorá je potrebná na výrobu jedného kusa rúry. V priemere to je okolo 1625 sekúnd (cca 27 minút od výstupu z karuselovej pece až po výstup z ťahovej redukovne).

3.3 Analýza vrubovej húževnatosti

V súčasnosti sa v energetickom priemysle používajú rôzne akosti materiálov pre rozdielne teploty aplikácie [14] [15]. Pre teploty použitia nad 400 °C sa využíva aj interná akosť ZP8Mn45, ktorá je v normách označovaná ako P235GH (kde symbol H označuje použitie rúr za zvýšených teplôt). V prípade energetického priemyslu je dôležitá medza pevnosti R_m a nárazová práca KV.

Analytické spracovanie vplyvu celkovej redukcie plochy prierezu na veľkosť zrna

V súvislosti s analýzou vplyvu celkovej redukcie plochy prierezu súvisí aj krehkolomová odolnosť, ktorá je vyjadrená pomocou minimálnej nárazovej práce pri danej teplote skúšania vyplýva, že v priebehu valcovania rúr sa musí kontrolovať a riadiť hlavne veľkosť feritického zrna (35). Čím je výsledné feritické zrno jemnejšie, tým je vyššia hodnota R_e a zároveň lepšia krehkolomová odolnosť (nižšia tranzitná teplota) [16] [17].

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-\frac{1}{2}} \quad (35)$$

kde σ_y popisuje medzu klzu materiálu, σ_0 je frikčné napätie, d je veľkosť zrna a k_y je materiálová konštanta [18] [16].

Vychádzajúc z fyzikálnych zákonitostí feriticko-perlitickej premeny austenitu za spolupôsobenia deformácie sme navrhli matematický model (36):

$$d = d_0 \exp(-k \varepsilon_{red}) \quad (36)$$

kde d (μm) je výsledná veľkosť feritického zrna a ε_{red} je redukcia plochy prierezu lupy na výslednú plochu prierezu vyvalcovanej rúry.

Tento vzťah (36) môžeme upraviť nasledovne (37):

$$\ln d = \ln d_0 - k \varepsilon_{red} \quad (37)$$

Jeho úpravou je získaná nasledujúca lineárna rovnica (38):

$$y = a - bx \quad (38)$$

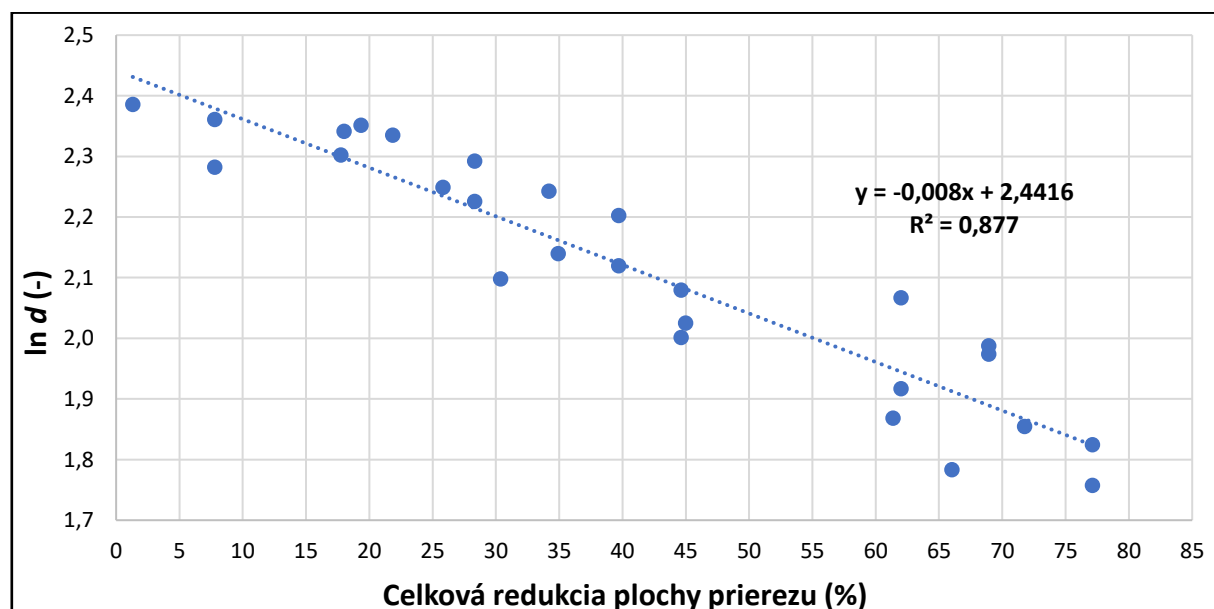
Pričom platí (40):

$$a = \ln d_0 \quad (39) \quad a \quad b = k, \quad (40)$$

čo je označenie definovaných parametrov priamky, ktoré je možné stanoviť regresnou analýzou, pričom d_0 vo vzťahu vyjadruje veľkosť feritického zrna v prípade ak $\varepsilon_{red} = 0$.

Overený technologický prípad je keď sa lapa po výstupe z krokovej peci ochladzuje na výbehovom úseku valcovne rúr bez deformácie. Na druhej strane je potrebné dôsledne kontrolovať výsledný objemový podiel perlitu, ktorý síce zvyšuje medzu sklzu $R_e(\sigma_y)$, ale skrehuje materiál, čiže znižuje krehkolomovú odolnosť. Reguláciou deformácie, rýchlosti deformácie pri danej teplote valcovania je možné dosiahnuť fázovú premenu austenitu na feriticko-perlitickú štruktúru za spolupôsobenia deformácie, tak aby bolo dosiahnuté požadované jemné feritické zrna. Teória riadeného valcovania definuje príslušné fyzikálno-metalurgické zákonitosti, ktoré sú napríklad formulované Avramiho rovnicou.

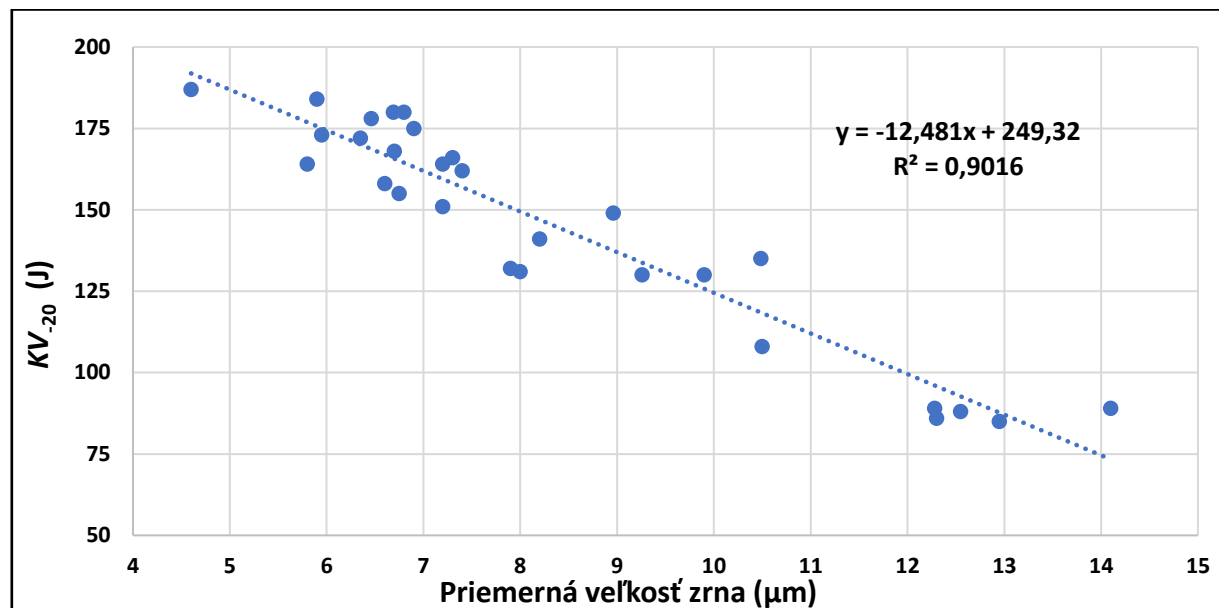
V súvislosti s experimentom boli realizované rozsiahle analýzy, pri ktorých bolo uvažované so zmenou geometrie valcovanej rúry pre danú nápichovú skupinu. Ukázalo sa, že práve redukcia plochy prierezu ε_{red} veľmi dobre definuje objemovú prácu pre plastické pretvorenie jednotkového objemu lapa na jednotkový objem vyvalcovanej rúry [17].



Obr. 10 Závislosť logaritmu veľkosti zrna na celkovej redukcii plochy prierezu

Vzhľadom na daný rozsah experimentu je možné vidieť tendenciu (obr. 10) klesajúcej hodnoty prirodzeného logaritmu veľkosti feritického zrna, a tým je celková redukcia plochy prierezu vyššia, čo umožní dosiahnutie jemnejšieho zrna feritu. Na obr. 11 je zobrazená závislosť nárazovej práce pri teplote $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ na priemernú veľkosť feritického zrna. Hodnota nárazovej práce stúpa s klesajúcou hodnotou priemernej veľkosti feritického zrna. Počas hodnotenia nárazovej práce sa objavili prípady nedodržania predpísanej hodnoty, čo bolo spôsobené celkovou redukciou plochy prierezu, ktorá bola veľmi nízka. To znamená, že nízka

hodnota nárazovej práce úmerne vplýva na prípady kedy v ťahovej redukovni dochádza k veľmi malej deformácií.



Obr. 11 Závislosť nárazovej práce pri - 20 °C na veľkosti feritického zrna

Celková redukcia plochy prierezu má dôležitý vplyv na hodnotu nárazovej práce, kedy je možné definovať jej hraničné hodnoty a to nasledovne:

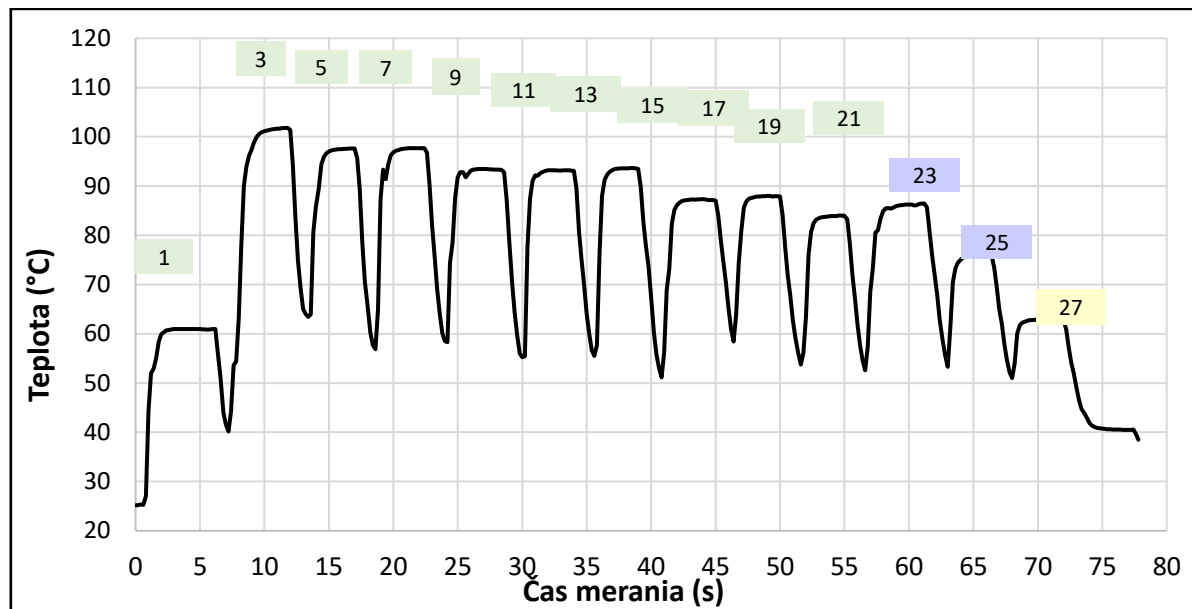
- do 10 % dochádza k nedodržaniu,
- 10 ÷ 30 % dochádza k nedodržaniu hodnôt len sporadicky,
- od 30 % všetky hodnoty sú dodržané.

3.4 Povrchová teplota valca

V práci bola venovaná pozornosť aj používaným nástrojom. Pre plnohodnotné poznanie procesu bolo nutné systematicky realizovať analýzy nastavenej teploty v krokovej peci, dovalcovacej teploty, časového priebehu termicko-deformačných procesov v súvislosti s vplyvom na povrchovú teplotu valca.

Počas experimentov bolo skúšaných niekoľko rozmerov z výrobného sortimentu určeného pre energetický priemysel. Všetky experimenty bolo možné realizovať s vysokou opakovateľnosťou. Povrchové teploty boli v rozsahu od 30 °C do 120 °C so smerodajnou odchýlkou 0,8 °C. Povrchové teploty valcov je možné porovnávať len na základe geometrie kalibra.

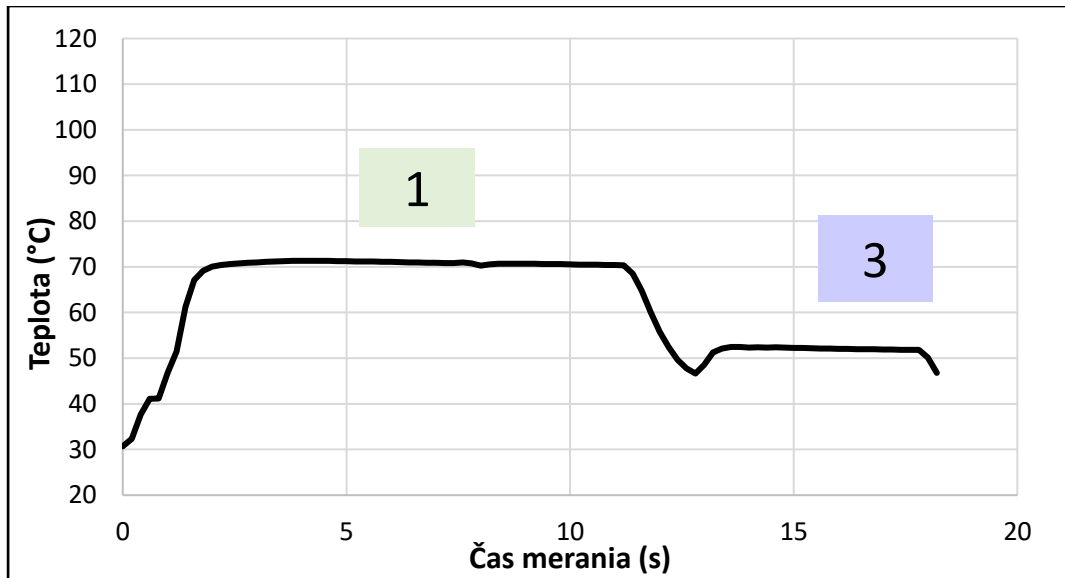
Na obr. 12 je graficky znázornený výsledok merania povrchovej teploty valcov počas valcovania rozmeru A. Na uvedenom grafe je možné vidieť použitie 27 stojanov ťahovej redukovne z čoho bolo 22 kusov pracovných (zelený štvorec) a 4 kusy fertigov (fialový štvorec). Stojan č. 27 (žltý štvorec) slúžil ako vodiaci stojan.



Obr. 12 Povrchová teplota valcov počas valcovania rúry s rozmerom $31,8 \times 2,9$ mm

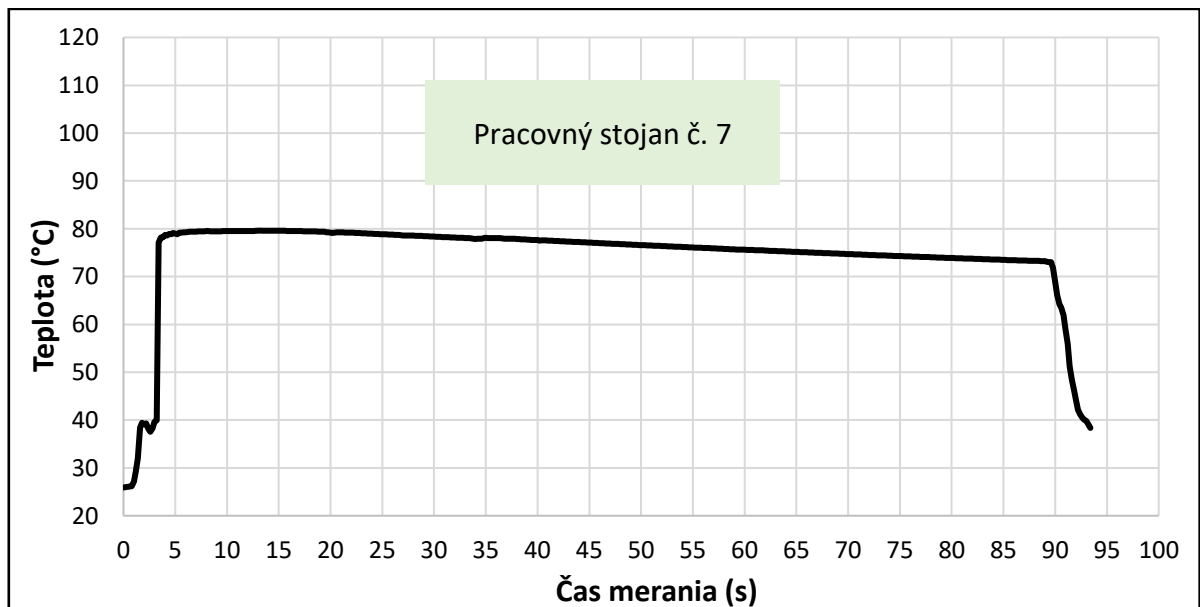
Povrchová teplota valca závisí najmä od teploty vstupujúcej lupy a celkovej veľkosti redukcie plochy prierezu. Stojan č. 1 má povrchovú teplotu okolo 60 °C, čo bolo spôsobené nízkou redukciovou prierezu pod 3 %. Stojany č. $3 \div 22$ majú vyššiu redukciovú a to v rozsahu $4 \div 7$ %, čo vplýva aj hodnotu povrchovej teploty kalibrov. V uvedenom prípade boli teploty v rozsahu od $85 \div 103$ °C. Fertigy majú veľmi nízkou redukciovú (pod 3 %), teda skôr slúžia ako hladiace stojany. Ich povrchová teplota nestúpne na viac ako 80 °C, čo je maximálna hodnota v prípade valcov z liatiny. Ak by boli použité valce zo spekaných karbidov ich povrchová teplota by nemala prekročiť viac ako 60 °C, čo je hodnota doporučená výrobcom.

Špecifický prípad je zobrazený na obr. 13, kde je možné vidieť 1 pracovný, 3 fertigy a jeden vodiaci stojan, pričom celkový počet stojanov v ťahovej redukovni je v tomto prípade 5. V tomto prípade je redukcia veľmi nízkou ale aj napriek tomu je zabezpečený dostatočný kontakt plochy rúry s valcom, čo indikuje maximálnu povrchovú teplotu valca okolo 70 °C.



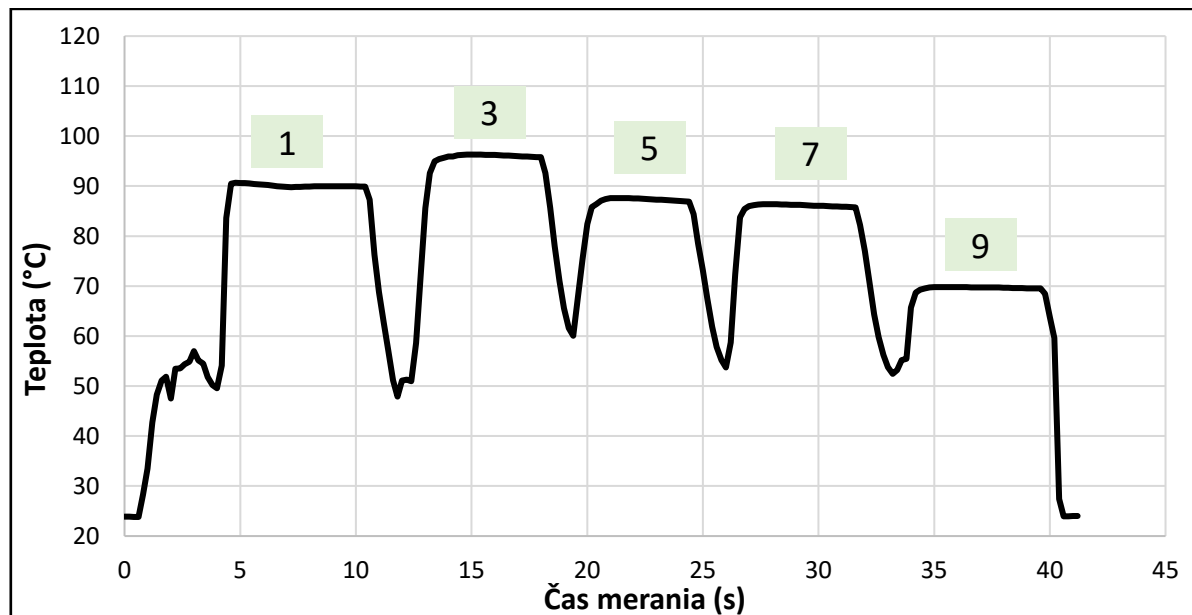
Obr. 13 Povrchová teplota valcov počas valcovania rúry s rozmerom $133,0 \times 4,5$ mm

Pre overenie výdrže valca na teplote s najväčšou redukciou a deformáciou prebehlo po odvalcovaní cca 200 kusov rúr, kedy sa je možné definovať ustálený stav resp. rovnomerne ohriaty valec v celom priereze. Obr. 14 potvrdzuje hypotézu, že v ktoromkoľvek valci sa teplota výrazne nemení ani počas procesu valcovania a taktiež počas chladenia valcov mimo odmeraný rozsah. Dôležitým faktorom bude len teplota vstupujúcej lupy a funkčnosť systému chladenia, pričom uvedené platí za predpokladu, že valcovaný materiál zostáva v kalibri oveľa kratší čas ako je dĺžka merania (napr. valcovanie jednej rúry prebieha ~ 15 sekúnd).



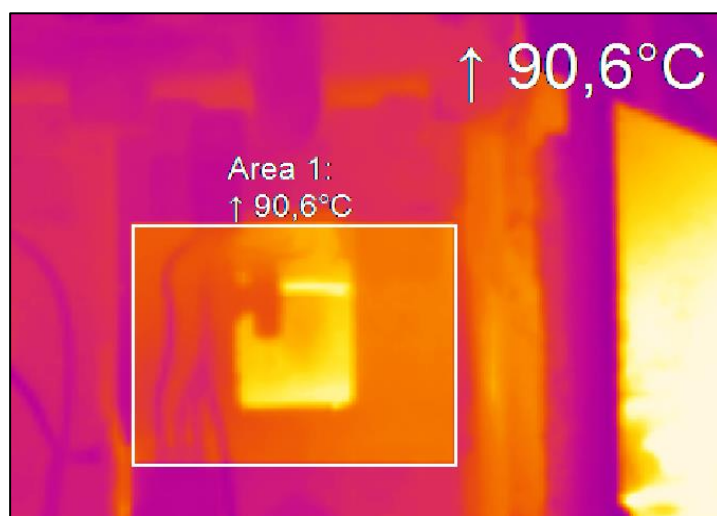
Obr. 14 Povrchová teplota kalibra pracovného stojana č. 7

Na obr. 15 je prezentované meranie pracovných kalibrov s použitím dýzy s prietokom 7,8 l/min. nominálnym tlakom, kde je redukcia s priemernou hodnotou okolo 4 %, čo mohlo zapríčiniť mierny nárastu povrchovej teploty valca až na 90 °C oproti dýze s prietokom 10 l/min.



Obr. 15 Meranie povrchovej teploty valca pomocou kontaktného prototypového systému

Bola overená možnosť prepojenia termografickej analýzy a kontaktného merania povrchovej teploty, pričom bola experimentálne stanovená emisivita lesklého povrchu valca. Príklad je uvedený na obr. 16, kde je možné vidieť maximálnu povrchovú teplotu 90,6 °C. Porovnaním obr. 15 a obr. 16 je viditeľná podobnosť povrchových teplôt kalibra v stojane č. 1, čo potvrdilo dostatočnú spoľahlivosť bezkontaktného merania pomocou dlhovlnnej termokamery .



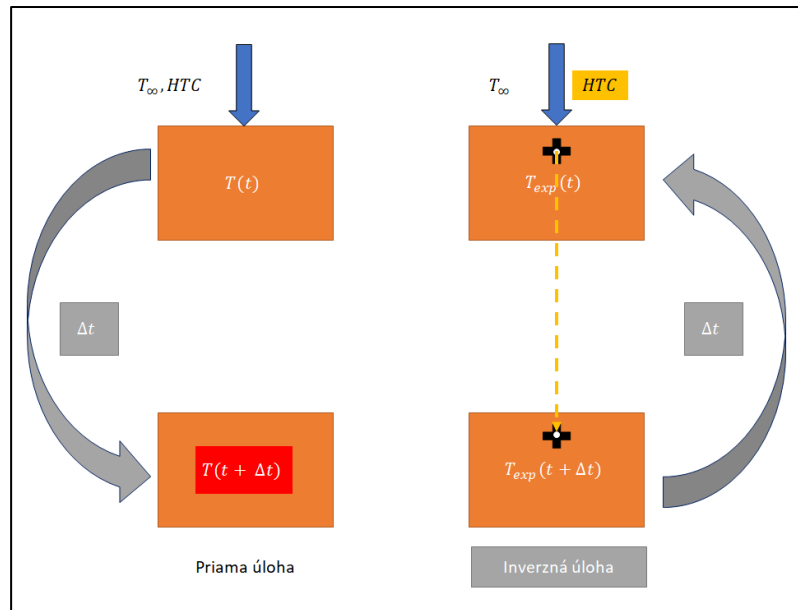
Obr. 16 Meranie povrchovej teploty valca termokamerou - stojan č. 1

V súčasnosti je možné hovoriť o riadenom chladení, ktoré sa ukázalo ako slabý článok technológie, ktorý spôsoboval nešetrné používanie chladiacej vody, čo malo za následok lokálne ochladzovanie prechádzajúcej rúry.

3.5 Analýza vplyvu chladenia valcov

V prípade, že je známa povrchová teplota ale nepoznáme teplotné pole vo vnútri skúmaného objektu a dokonca nie sú známe ani podmienky potrebné pre prestup tepla cez jeho hranice, potom je možné určiť teplotné pole vo vnútri telesa v ľubovoľnom čase pomocou koeficientu prestupu tepla. Takáto úloha sa nazýva inverzná. Ak by sme poznali teplotné pole vo vnútri skúmaného objektu a podmienky potrebné pre prestup cez jeho hranici, potom by bolo možné určiť teplotné pole vo vnútri telesa cez priamu úlohu. Priama úloha postupuje z fyzikálneho hľadiska od príčiny k dôsledku. Príčinou sú tu podmienky priebehu prenosu tepla a dôsledkom sú potom výsledné zmeny teplotných polí v telese. V technickej praxi býva často stanovenie okrajových podmienok značne problematické [19] [20].

Často býva k dispozícii experimentálne zistený časový priebeh teplôt v niekoľkých bodoch vo vnútri telesa. Úloha, ktorej cieľom je získanie okrajových podmienok zo známeho teplotného priebehu vo vnútri telesa sa nazýva inverzná úloha vedenia tepla. Pre riešenie inverznej úlohy je nutné poznať riešenie priamej úlohy. Inverzné úlohy patria do triedy matematicky nekorektných úloh, čo znamená, že nie je možné obecné zaručiť existenciu a jednoznačnosť riešenia. Inverzné úlohy sú veľmi citlivé na chyby merania. V prípade, že nameraná hodnota teploty je odlišná ako hodnota, ktorú môže vyvolať ľubovoľná zmena okrajovej podmienky, potom nie je možné nájsť riešenie inverznej úlohy. V uvedenom prípade platí, že obtiažnosť úlohy narastá s tým, ako sa veľkosť sledovaných zmien meranej teploty približuje k presnosti merania.



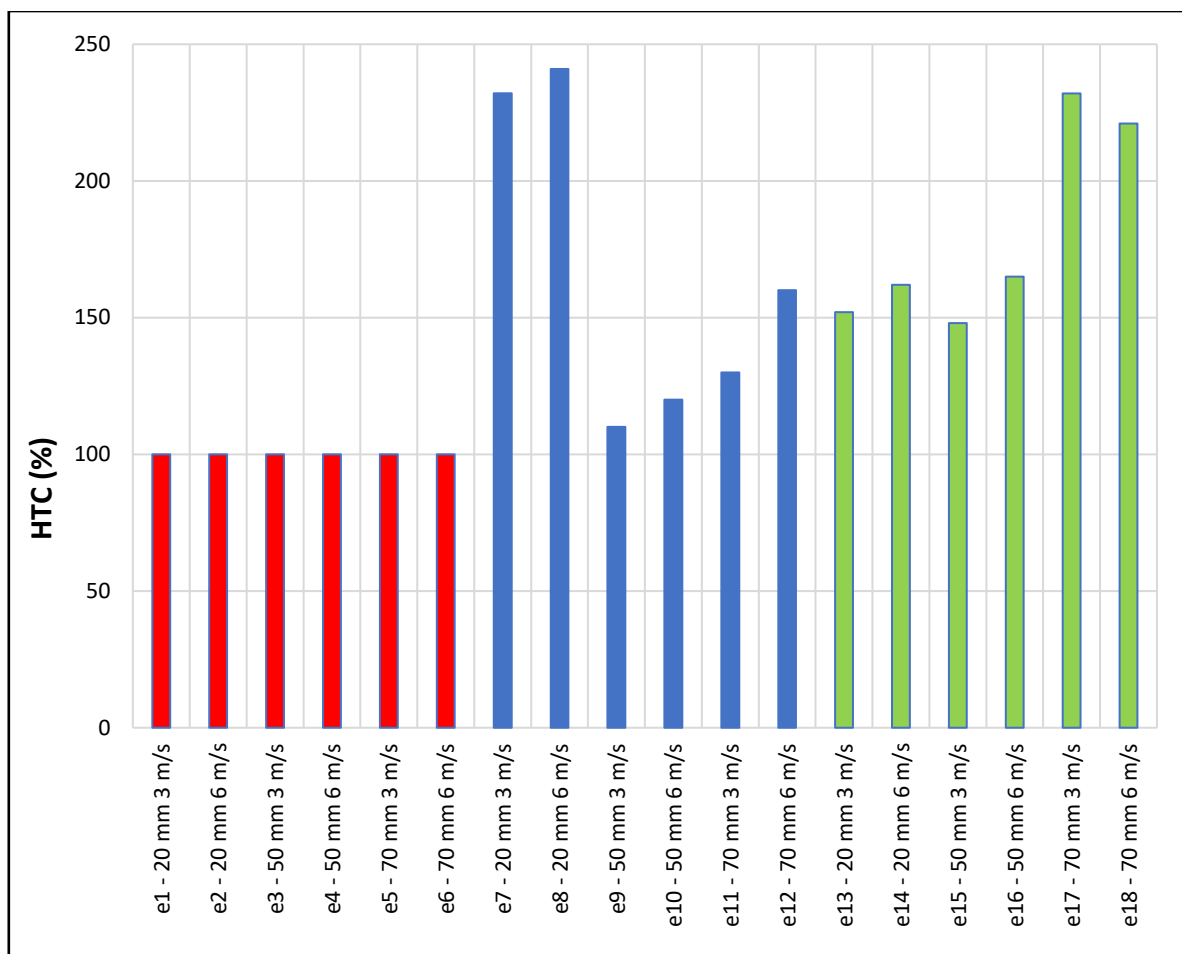
Obr. 17 Princíp riešenia priamej a inverznej úlohy [20]

Ďalšie problémy nastávajú keď je úloha nelineárna. Všetky inverzné úlohy stanovenia súčiniteľa prestupu tepla sú nelineárne úlohy. Problémy s nekorektnosťou úloh riešil Tikhonov [19] [20] [21] pomocou tzv. regularizačnej metódy aby znížil citlivosť metódy na chyby spôsobené nepresnosťou merania. Každá inverzná úloha je založená na riešení priamej úlohy (obr. 17) [19] [20].

Koeficient prestupu tepla (41) je kvantitatívna charakteristika prenosu tepla medzi tekutým médiom a povrchom valca. Táto charakteristika sa javí ako faktor proporcionality [22]:

$$q_2 = HTC(T_{valca} - T_{voda}) \quad (\text{W/m}^2) \quad (41)$$

kde q_2 je hustota tepelného toku, T_{valca} je teplota valca, T_{voda} je teplota vody, HTC (Heat Transfer Coefficient) je koeficient prestupu tepla. Z realizovaných meraní koeficientu prestupu tepla vyplýva, že použitím kužeľového lúča s uhlom rozstreku (120°) povedie k výraznému zlepšeniu chladenia v porovnaní s plochým lúčom s uhlom rozstreku (60°), kde hlavný rozdiel je vyplnenie kalibra valca rozstrekováním médiom.



Obr. 18 Efektívnosť chladenia valca pre teploty pod 100 °C

Ako je možné vidieť na grafe (obr. 18) kuželová dýza priniesla výrazné zlepšenie chladiaceho účinku pri teplotách pod 100 °C minimálne o 20 %, pričom je nutné vziať do úvahy aj vzdialenosť dýzy od povrchu valca. Vzdialenosť dýzy od povrchu valca je definovaná výrobcom na základe jeho testov uhla rozstreku a vzdialenosti, kedy je možnosť rozstreku plného kužela, čo zaručuje ideálne chladenie povrchu valca.

3.5.1 Rozloženie tlaku dopadajúcej vody

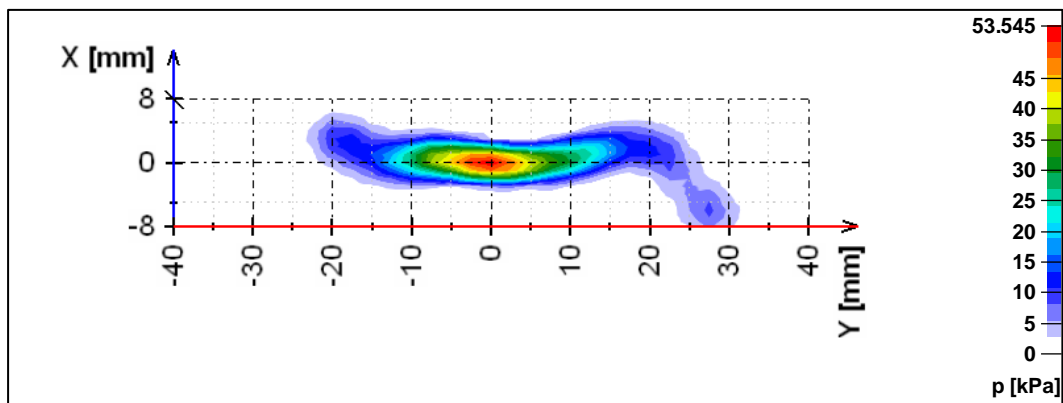
Meranie rozloženia tlaku dopadajúcej vody z dýzy (impaktu) bolo realizované vo vzdialenosti 50 mm od povrchu a pri nominálnom tlaku 4 bar. Boli použité nasledujúce tri dýzy s rôznym tvarom lúča a s rôznym prietokom (viď obr. 19):

- vejárová dýza (zelená) s uhlom rozstreku 60° s prietokom 20 l/min.
- kuželová dýza (modrá .728) s uhlom rozstreku 120° s prietokom 10 l/min.,
- kuželová dýza (červená .808) s uhlom rozstreku 120° s prietokom 15 l/min.



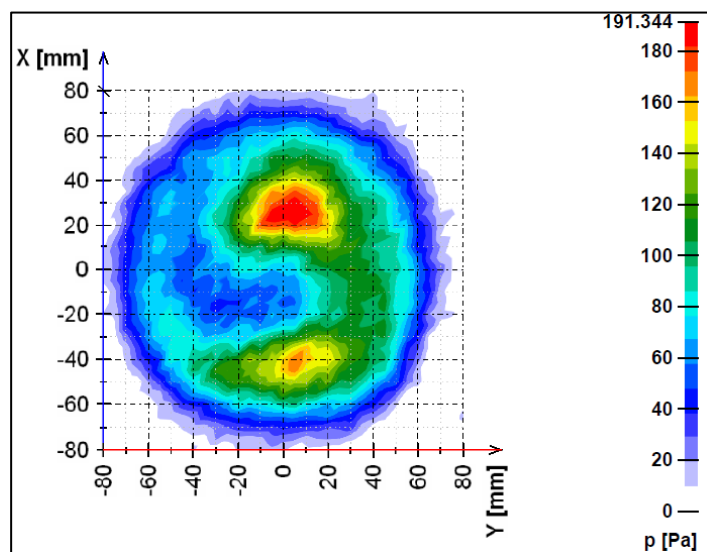
Obr. 19 Porovnanie dýz z hľadiska tvaru lúča (vľavo – kužeľová, vpravo – vejarová)

Primárny rozdiel dýz bol, že pri nominálnom tlaku ale pri zachovaní podobného prietoku, pričom tento rozdiel môže spôsobovať rozdielna vzdialenosť dýzy od valca. Hlavným rozdielom uvedených dýz je tvar lúča dopadajúceho na povrch chladeného objektu (obr. 19).



Obr. 20 Rozloženie tlaku dopadajúcej vody na plochu – vejarová dýza

Hlavný rozdielom kužeľovej a vejarovej dýzy je chladená plocha. Z uvedeného vyplýva, že kužeľová dýza chladí 10x väčšiu plochu ako vejarová (obr. 20 a obr. 21).



Obr. 21 Rozloženie tlaku dopadajúcej vody na plochu – kužeľová dýza

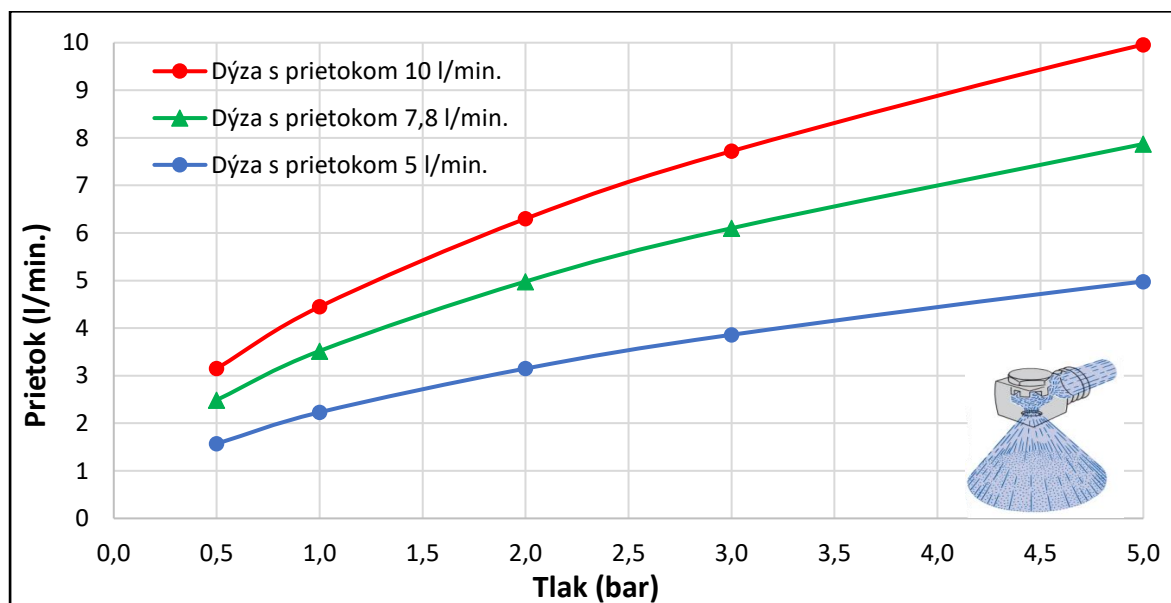
Použitím dýzy s kužeľovým lúčom je možné dosiahnuť výrazné zlepšenie chladenia valca a to aj pri úspore vody okolo 30 %. a zanedbaní natočenia dýzy smerom na valec.

3.5.2 Porovnanie prietokov a tlakov dýz

Experiment bol realizovaný pre otestovanie účinnosti rovnakého prietoku pri použití rôznych typov dýz. Bola dodržaná hlavná okrajová podmienka, ktorou bol prietok pri použití všetkých troch typov skúšaných dýz v dvoch chladiacich vetvách. Na obr. 22 je zobrazené porovnanie prietokov troch typov trysiek, ktoré boli použité počas experimentu.

Experiment slúžil pre porovnanie chladiaceho účinku navrhovaných typov dýz s prepojením na kontaktné meranie povrchovej teploty kalibrov, ktorá bola realizovaná podľa metodiky uvedenej v kapitole vyššie vo vybraných stojanoch.

Dýza s nominálnym prietokom 10 l/min. (typ .728 – A) mala nastavený tlak 1,25 baru, dýza s nominálnym prietokom 7,8 l/min. (typ .686 – B) mala nastavený tlak 2,25 baru a dýza s nominálnym prietokom 5 l/min. (typ .608 – C) mala nastavený tlak 5 barov (obr. 22). Všetky typy dýz mali výstupný lúč vody vo forme plného kužeľa.

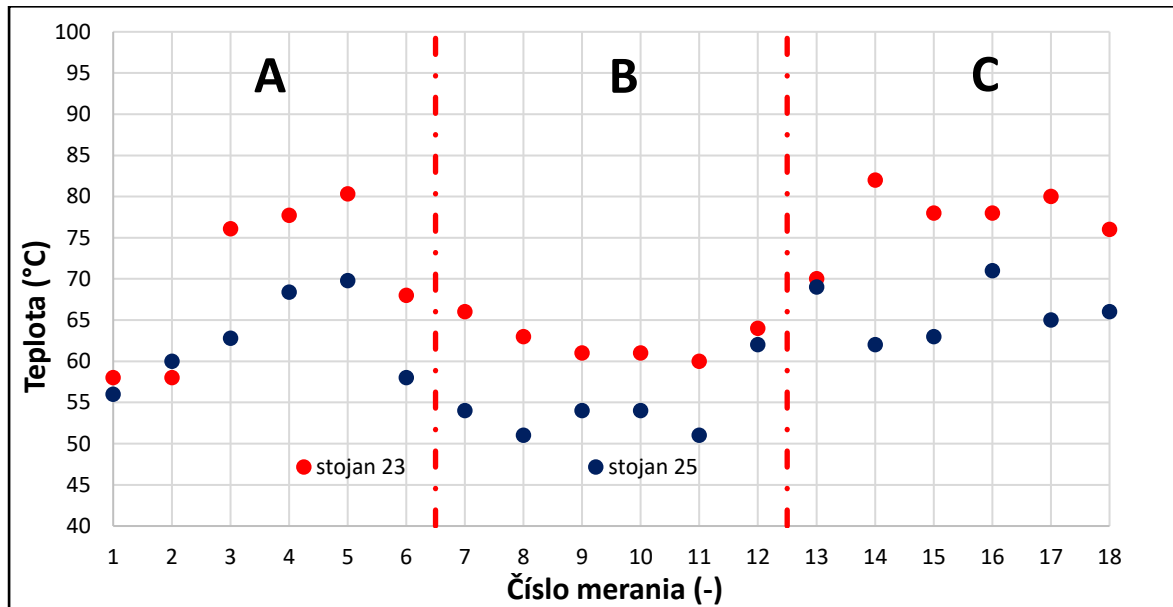


Obr. 22 Porovnanie prietokov troch typov dýz a ilustrácia plného vodného kužeľa

Z realizovaných experimentálnych meraní povrchovej teploty bola priemerná teplota B-valca v stojane č. 23 je vyššia ako na stojane č. 25. Podľa obr. 23 je preukázateľné, že:

- použitím dýzy B oproti dýze C dochádza k intenzívnejšiemu ochladzovaniu valcov a to v priemere o 13 °C,

- použitím dýzy B oproti dýze A dochádza k intenzívnejšiemu ochladzovaniu valcov a to v priemere o 8 °C,
- použitím dýzy A oproti dýze C dochádza k ohrevu valcov v priemere o 5,0 °C.



Obr. 23 Porovnanie povrchových teplôt valcov pri použití troch typov chladiacich dýz

3.6 Numerická simulácia valcovania rúr

Uvedená časť experimentu dokumentuje numerickú simuláciu procesu valcovania a odhad zaťaženia jednotlivých kalibrov, pričom jej použitím je možné zefektívnenie procesu. Vysoké teplotné zaťaženie a nevhodné cykly znižujú životnosť valcov, čo je nežiaduce pre proces. Znalosť teplotného zaťaženia jednotlivých kalibrov pri výrobe definovaného sortimentu prispeje k efektívnemu nastaveniu prietokov chladiacich vetiev a k čiastočnému predĺženiu životnosti kalibrov.

V numerickej simulácii boli využité všetky praktické poznatky získané prevádzkovými a laboratórnymi experimentami. Na začiatku realizácie prvých simulácií to boli hlavne úpravy prestupov tepla do valcov a sálanie do okolitého prostredia, aby výsledná dovalcovacia teplota bola zhodná so skutočnou. Pre validáciu bol použitý rozmer C valcovaní v nápichovej skupine č. 1 (hrúbka steny 2,6 ÷ 4,0 mm) v oválnej kalibračnej rade. Tento rozmer bol vhodný nielen pre množstvo údajov potrebných k simulácii ale aj vzhľadom na náročnosť výpočtov len s použitím 11-tich stojanov. Vďaka ušetrenému výpočtovému času oproti rozmeru s väčším počtom stojanov bolo možné rýchlejšie zasiahnúť do prebiehajúcej simulácie a v prípade

potreby upraviť požadované vstupné podmienky pre čo najpresnejšie porovnanie so skutočnosťou. V predchádzajúcej etape boli doplnené materiálové údaje a okrajové počiatkové podmienky pre sledovanie tepelného vplyvu valcov na rúru.

V rámci realizovaných experimentov v oblasti chladenia valcov bolo získaných dostatok údajov pre verifikáciu a validáciu tohto modelu. Bolo nutné poznať všetky faktory, ktoré vplyvajú na termálne zmeny v procese. Medzi najdôležitejšie patria samotné koeficienty prestupov tepla medzi jednotlivými materiálmi ale aj ich termofyzikálne vlastnosti ako tepelná vodivosť, kapacita, emisivita, merné teplo či hustota, ktoré boli zahrnuté do simulácie. Pri zahrnutí všetkých údajov bolo nevyhnutné mierne upraviť hlavne HTC [22] medzi rúrou a valcom, pretože uvedená hodnota nebola k dispozícii a nebolo ju možné fyzikálne simulovať. Uvedená hodnota bola experimentálne stanovená na základe skutočnej dovalcovacej teploty.

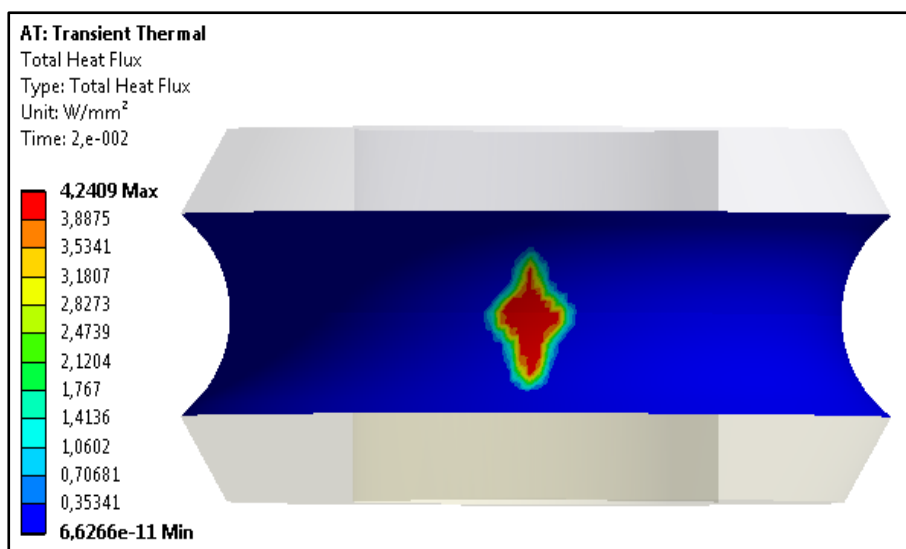
Proces valcovania rúr je realizovaný za vysokých teplôt, kedy teplota lupy vstupujúcej do prvého kalibru dosahuje teploty okolo 980 °C. Lupa sa postupne dostáva do kontaktu s jednotlivými kalibrami a vplyvom prestupu tepla im odovzdáva určitú časť svojej teploty. Odvod tepla sa realizuje pomocou vodného chladenia. Z toho dôvodu je nutné čo najpresnejšie popísať a namodelovať celý proces [11]. Celkový pokles teploty z 960 °C na 806 °C bol výrazný a počas valcovania v 11 stojanoch prebehol za cca 2,5 sekundy.

V prípade optimálneho nastavenia chladenia valcov by malo dôjsť k predĺženiu ich životnosti a zvýšeniu produktivity výroby rúr. Pre hľadanie optimálneho chladenia jednotlivých kalibrov boli realizované výpočtové analýzy valcovania a procesu ohrievania kalibrov. Cieľom výpočtových analýz bolo:

- príprava funkčného štruktúrného modelu pre simulácie valcovania rúr,
- simulácia teplotného zaťaženia a odhad prenosu tepla v kontakte medzi rúrou a kalibrom,
- simulácia valcovania kampane,
- simulácia vývoja teploty v jednotlivých kalibroch v priebehu kampane.

3.6.1 Výsledky simulácií

Prezentované výsledky pochádzajú z numerickej simulácie. V prvom kroku bol simulovaný proces valcovania. V ďalšom kroku bola realizovaná teplotná analýza jednotlivých kalibrov. Zo simulácií boli vybrané výsledky dokumentujúce priebeh výpočtu.



Obr. 24 Tepelný tok vo vybranom kalibri

Na obr. 24 je graficky znázornený tepelný tok vo vybranom kalibri, ktorý je možné popísať ako prechodný jav (prechod tvárneného materiálu cez kaliber). Uvedený parameter sa mení na základe dĺžky a šírky kontaktu a hlavne v závislosti od úberu.

Tab. 1 Výsledky štruktúrálnej a termálnej analýzy

Označenie kalibra	Šírka kontaktu (mm)	Dĺžka kontaktu (mm)	Úber (mm)	Tlak v kontakte (MPa)	Teplota rúry (°C)	Súčiniteľ prenosu tepla (W/m ² K)
Stojan 1	46	10	0,8	60	961	9700
Stojan 2	145	35	4,3	63	961	11900
Stojan 3	135	43,4	6,5	85	950	13200
Stojan 4	126	40,7	6,9	80	940	12300
Stojan 5	117	46,8	7,1	80	930	12100
Stojan 6	109	38	7,2	80	920	8300
Stojan 7	100,8	45,1	6,7	70	910	7070
Stojan 8	96	43	3,8	50	900	5253
Stojan 9	61,6	42	2,7	60	890	5204

Na základe hodnôt v tab. 1 je najväčší tlak v kontakte v stojane č. 3, pretože je najväčšia hodnota redukcie. S klesajúcou redukciou tlak v kontaktne. V rámci životnosti valcov je možné definovať niekoľko ďalších vplyvov, ktoré pôsobia na životnosť valca okrem redukcie, to je tlak v kontaktne, kvalita vody (pH, abrazívne častice, teplota).

3.6.2 Simulácia valcovacej kampane

Parametre simulácie ako sú vstupné teploty lúp, rýchlosť valcovania, kadencia valcovacej trate a dĺžka medzery odpovedali reálnej valcovacej kampani. V simuláciách bola použitá priemerná dĺžka lupy a priemerná pauza medzi lupami (tab. 2).

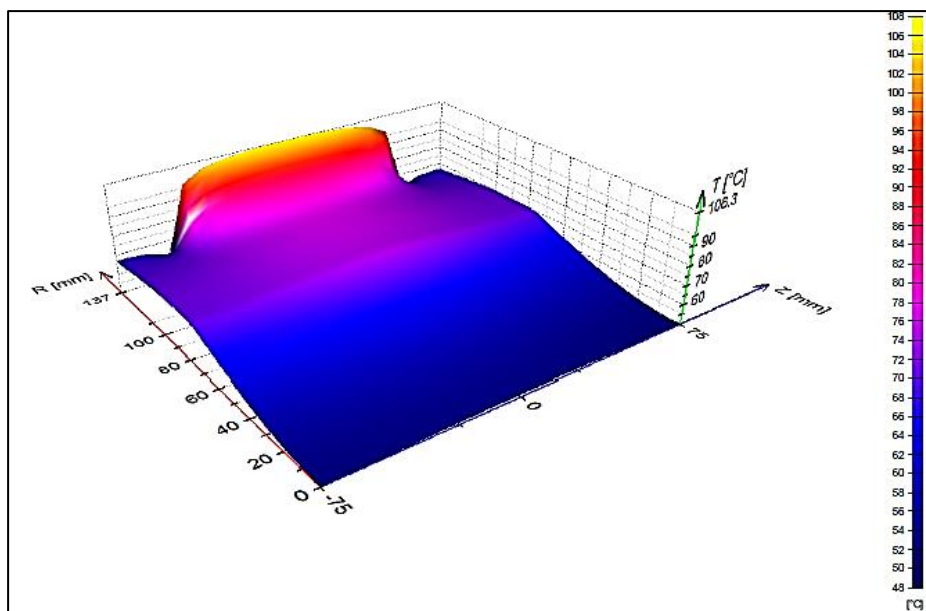
Okrajová podmienka, ktorá popisovala systém chladenia bol použitý koeficient HTC. Napriek tomu, že podmienka použitá v simuláciách presne neodpovedala skutočnému nastaveniu v prevádzke, bola nahradená takou podmienkou, ktorá sa čo najviac približovala k prevádzkovému stavu. Koeficienty prestupu tepla medzi lupou a jednotlivými kalibrami boli vypočítané programovým systémom ANSYS a sú uvedené v tab. 1.

Simulácie boli realizované na kalibroch 1 až 9, pričom prvý stojan je používaný ako „vodiaci“ a teda nie je zaťažený ako stojany 2 ÷ 9. U valcov v stojanoch 10 a 11 bol zistený len minimálny kontakt s lupou a simulácie pre tieto stojany neboli realizované. Je možné predpokladať, že teplota týchto dvoch posledných kalibrov bude vždy nižšia ako teplota kalibra č. 9.

Tab. 2 Tabuľka parametrov realizovaných simulácií

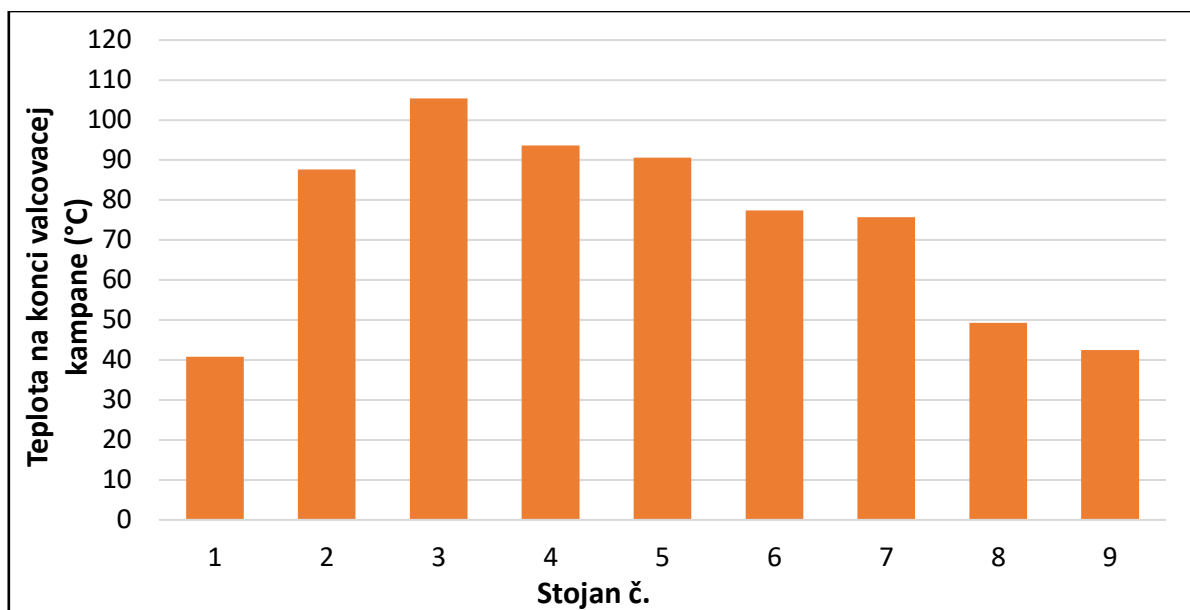
Označenie valca	Rýchlosť (m/s)	Priemerná dĺžka rúry (m)	Čas kontaktu (s)
Stojan 1 – vodiaci	1,44	20,00	13,89
Stojan 2 – pracovný	1,44	20,10	13,96
Stojan 3 – pracovný	1,50	21,02	14,01
Stojan 4 – pracovný	1,59	22,26	14,00
Stojan 5 – pracovný	1,71	23,96	14,00
Stojan 6 – pracovný	1,86	25,98	13,97
Stojan 7 – pracovný	2,01	28,11	13,98
Stojan 8 – pracovný	2,10	29,33	13,97
Stojan 9 – pracovný	2,15	30,07	13,99
Stojan 10 – pracovný	2,17	30,45	14,03
Stojan 11 – pracovný	2,18	30,51	14,00

Ďalším z výstupov tejto simulácie bolo teplotné pole vo valci vo vybranom čase, ktoré je zobrazené na obr. 25. Uvedené teplotné pole je popísané rozložením valca do 2D profilu, ktorý ilustruje dve rôzne časti. Prvá časť je kontakt lupy s valcom s maximálnou teplotou 105 °C. Druhá časť je definované ako chladenie valca v rozsahu teplôt 40 ÷ 60 °C. Rozloženie do 2D profilu je vhodné z hľadiska pohybu valca s určitými otáčkami.



Obr. 25 Teplotné pole vo valci 8 minút po začiatku valcovania

Teploty valcov počas valcovacej kampane boli vyhodnotené v čase 1200 sekúnd, kedy dochádzalo k vyrovnaniu teplôt medzi povrchovými a podpovrchovými vrstvami (obr. 25). Odčítanie výslednej teploty bolo realizované v čase cca 2 minúty po skončení valcovacej kampane.



Obr. 26 Teplota na konci valcovacej kampane

Navrhnutý experimentálny postup umožňoval realizáciu simulácie valcovania rúr v ťahovej redukovni. Uvedený postup kombinuje simuláciu v komerčne dostupných softvéroch so simuláciou v špecializovanom softvéri SimRoll. Použitím komerčného a špecializovaného softvéru je možné detailne analyzovať nielen teploty ale aj deformáciu valcovanej rúry pri prechode kalibrmi.

4 ZÁVERY A DISKUSIA

Predkladaná dizertačná práca sa zaoberá výskumom valcovania ocelových bezšvíkových rúr akosti P235GH s aplikáciou v energetickom priemysle do teploty 450 °C. Predmetná oceľ bola zvolená na základe štatistického rozboru objemov valcovaných akostí v prevádzkarni Valcovňa rúr ŽP a.s.

V experimentálnej časti boli realizované početné merania povrchovej teploty výlisku, vývalku, lupy a rúry od výstupu z karuselovej pece až po výstup z ťahovej redukovne. Realizované merania potvrdili závislosť poklesu teploty materiálu počas jeho prechodu cez valcovaciu trať. Ohrev klátikov v peci bol riadený matematickým modelom GIWEP. Modelová výstupná teplota v momente vyťahnutia klátika bola 1270 °C. Výberová smerodajná odchýlka bola spracovaná zo 100 klátikov z rôznymi dĺžkami, ktorý boli valcované na tenkostenné A, B a hrubostenné C, D rozmery. Po kalibrovaní bola priemerná povrchová teplota 1224 °C ($s = 34$ °C). Na výlisku bola odmeraná priemerná teplota 1191 °C ($s = 27$ °C), kde bol pokles spôsobený v lokálnom kontakte s lisovnicou dierovacieho lisu. Priemerná teplota vývalku bola 1222 °C ($s = 38$ °C), kde bol sledovaný nárast teploty z dôvodu odstránenia oxidických vrstiev materiálu. Priemerná teplota lupy bola 1170 °C ($s = 4$ °C). Za odvalcovacou stolicou bola priemerná teplota lupy 923 °C ($s = 32$ °C). Za odvalcovacou stolicou je nárast smerodajnej odchýlky spôsobený vplyvom kontaktu valcov a lupy, teda vznikali teplejšie a chladnejšie pásy na lupe. Vytiahnutie trňovej tyče z lupy a odrezanie predného a zadného konca pred vstupom do krokovej pece spôsobilo pokles teploty pod Ar₃. Následne lupa vstupuje do krokovej pece s priemernou teplotou 708 °C ($s = 18$ °C). Po ohreve v krokovej peci bola teplota lupy 956 °C ($s = 19$ °C), čo bolo spôsobené prítomnosťou okují na povrchu. Rúra vystupuje z ťahovej redukovne s priemernou teplotou 856 °C ($s = 5$ °C).

Kľúčovým technologickým parametrom je dodržanie dovalcovacej teploty v austenitickej oblasti. Vzhľadom na túto skutočnosť z dôvodu rýchlejšieho odvodu tepla pri tenkostenných rúrach je potrebné zvýšiť dovalcovaciu teplotu o 30 až 50 °C nad Ar₃. Keďže podmienky valcovania v ŽP a.s. umožňujú v krokovej peci dosiahnuť teplotu maximálne 1060 °C, čo je nie vždy dostačujúce na dosiahnutie požadovaných dovalcovacích teplôt nad Ar₃, je potrebné navrhnúť technológiu doohrievania lúp napr. indukčným ohrevom bezprostredne pred vstupom do ťahovej redukovne.

Vzorky boli odobrané z tenkostennej (rozmer A) a hrubostennej (rozmer D) rúry. Mikroštruktúry v prípadoch, kedy valcovanie prebehlo v dvojfázovej oblasti austenitu a feritu vykazovali heterogenitu vo veľkosti feritického zrna. To znamená, že v mikroštruktúre sa prevažne vyskytovali veľké zrná, ktoré boli obklopené malými zrnami. Priemerná veľkosť feritického zrna pre rozmer A a D so smerodajnou odchýlkou sú uvedené v tab. 3.

Tab. 3 Priemerná veľkosť feritického zrna pre rozmer A a D

Rozmer	d (μm)	s (μm)
A	5,3	0,5
D	7,2	0,9

Na vzorkách bola pozorovaná štandardná kvalita vonkajšieho a vnútorného povrchu. V prípade podkročenia teploty Ar_3 by bolo vhodné znížiť kadenciu valcovacej trate zo 6 na 2 kusy za minútu, čím by sa zvýšil čas ohrevu lupy v krokovej peci. Dlhším časom ohrevu by sa dosiahlo zrovnomenie teploty v priereze lupy, čo by spôsobilo zvýšenie dovalcovacej teploty. Uvedené zníženie kadencie by bolo neefektívne z ekonomického hľadiska.

V prípade akosti P235GH prebieha finalizovanie dodatočným normalizačným žiňaním, čím sa dosiahne homogénna štruktúra, ale za cenu vyšších nákladov na výrobu rúr.

Skúška vrubovej húževnatosti, ktorej určujúcim parametrom je priemerná veľkosť feritického zrna bola vykonaná na vzorkách:

- normovaného rozmeru $10 \times 10 \times 55$ mm pre hrúbky stien >10 mm,
- neštandardného rozmeru $5 \times 5 \times 55$ mm pre hrúbky stien <10 mm.

Počas realizovaného hodnotenia nárazová práca neklesla pod 70 J okrem dvoch prípadov tenkostenných rúr rozmeru A, ktoré boli považované za hrubú chybu. Tieto výsledky potvrdzuje silná lineárna závislosť nárazovej práce od priemernej veľkosti feritického zrna s koeficientom korelácie s hodnotou 0,9016, ktorý poukazuje na platnosť navrhnutého matematického modelu vyjadreného vzťahom (36).

Vyhodnotením nárazovej práce neštandardnej vzorky je možné definovať hodnotu 28 J ako veľmi nízku. Pre porovnanie neštandardnej a normovanej vzorky je vhodné nárazovú prácu prepočítať podľa prierezu vzorky pod vrubom.

V prípade nízkej celkovej redukcie plochy prierezu nebude dosiahnutá požadovaná mikroštruktúra s priemernou veľkosťou feritického zrna podľa normy ASTM E 112 – 96, čo spôsobí nedodržanie stanovenej nárazovej práce.

V tab. 4 je definovaná závislosť výslednej nárazovej práce KV₋₂₀ (J) od priemernej veľkosti feritického zrna d (μm) a celkovej redukcie plochy prierezu ε_{red} (%). Preto platí, že celkovou redukciou plochy prierezu do 10 % bolo možné dosiahnuť priemernú veľkosť feritického zrna nad 14 μm , čo spôsobilo nedodržanie nárazovej práce.

Tab. 4 Vplyv celkovej redukcie plochy prierezu na strednú veľkosť feritického zrna

ε_{red} (%)	d (μm)	KV ₋₂₀ (J)
< 10	> 14	≤ 70
10 ÷ 30	12 ÷ 14	> 70
> 30	< 12	

Celková redukcia plochy prierezu je určujúcim faktorom priemernej veľkosti feritického zrna, ktorá ovplyvňuje výslednú nárazovú prácu.

Meranie povrchovej teploty valcov slúžilo pre kvantifikáciu maximálne prípustných hodnôt pre jednotlivé rozmery kalibrov, verifikáciu koeficientu prestupu tepla a výsledkov simulácií. V závislosti od použitého kalibra dosahovali povrchové teploty valcov 30 – 120 °C ($s = 0,8$ °C). Reguláciou prietoku dýz nie je možné výrazne ovplyvniť hodnotu dovalcovacej teploty, čo bolo potvrdené valcovaním rúry bez chladenia valcov a bol zistený maximálny rozdiel teplôt 5 °C. Napríklad znížením prietoku na 1,5 l/min. by sa lokálne prehrievali valce a to nad teplotu 120 °C, čo by viedlo k poškodeniu valcov a stojanov. Uvedená situácia by spôsobila odstavenie ťahovej redukovne resp. celej valcovacej trate. Vzhľadom na to, že v laboratórnych podmienkach nie je možné dokonale napodobniť podmienky prevádzkové, výsledky merania teplôt sa líšili do prípustnej hranice maximálne do 5 %.

Realizácia laboratórnych meraní zameraných na zistenie koeficientu prestupu tepla pri dodržaní prevádzkových podmienok prispeli k zlepšeniu efektívnosti chladenia a to ušetrením 30 % chladiacej vody a zachovaním životnosti valcov.

Koeficient prestupu tepla valca bol dôležitá okrajová podmienka do numerických simulácií a jeho hodnota sa líšila v závislosti na type dýzy. Kuželová dýza s prietokom 10

l/min. dosiahla priemernú hodnotu $7\,800\text{ W/m}^2\text{K}$ v porovnaní s pôvodnou vejárovou s prietokom 20 l/min. , ktorá dosiahla priemernú hodnotu $4\,200\text{ W/m}^2\text{K}$.

Upravením prietoku všetkých kužeľových dýz na $5,0\text{ l/min.}$ pri rôznych tlakoch boli dosiahnuté nasledujúce priemerné hodnoty koeficientu prestupu tepla:

- dýza A – $10\,000\text{ W/m}^2\text{K}$,
- dýza B – $6\,500\text{ W/m}^2\text{K}$,
- dýza C – $4\,700\text{ W/m}^2\text{K}$.

Rozdiel priemernej hodnoty koeficientu prestupu tepla pre dýzy A a C pri tlaku 3 bar a vzdialenosti 50 mm od valca bol 170 %. Pri veľkom rozdielne tlakov, keď dýzy pracujú s rovnakým prietokom vody mal koeficient prestupu tepla klesajúcu tendenciu z dôvodu nesprávneho vyplnenia kužeľa, čo spôsobilo nedostatočné chladenie valcov.

Testovanie niektorých parametrov priamo vo výrobe je veľmi náročné a nákladné, a preto sa veľmi často používajú laboratórne experimenty a numerické simulácie, ktoré dokážu veľmi dobre popísať výrobný proces.

Verifikácia výsledkov numerických simulácií bola realizovaná pomocou prevádzkových meraní pre možnosť upravenia vstupných parametrov a okrajových podmienok.

Kvôli heterogénnemu rozloženiu teploty boli nanosené body na model valca, ktoré zabezpečili sledovanie priebehu teploty. Teploty valcov ťahovej redukovne boli vždy hodnotené po valcovacej kampani 50 kusov rúr, kedy dôjde k výraznému vyrovnaniu teplôt medzi povrchovými a podpovrchovými vrstvami materiálu valca. V numerickej simulácii počas kontaktu valca s lupou dochádzalo k prudkému zvýšeniu povrchovej teploty len v malej hĺbke cca 4 mm pod povrchom valca. Od povrchu smerom do stredu valca nebola zmena teploty tak výrazná a bolo možné sledovať len postupné prehrievanie valca. Vodiaci kaliber bol po valcovacej kampani ohriaty na priemernú teplotu 41 °C . Kaliber stojana číslo 3 mal po valcovacej kampani priemernú teplotu 100 °C , ktorá bola rovnomerná až do hĺbky 4 mm pod povrchom. Numerické simulácie boli experimentálne verifikované a ich hodnoty vykazovali rozdiel menší ako 5 %.

Táto práca sa zaoberala analýzou vplyvu chladenia valcov s rôznymi parametrami, na základe ktorých bola nastavená metodika prevádzkových meraní (povrchová teplota valca a lupy). Dôležitým výsledkom je účinný systém chladenia valcov ťahovej redukovne.

5 PRÍNOSY DIZERTAČNEJ PRÁCE PRE VEDU, PRAX A PEDAGOGIKU

Prezentovaná práca má experimentálno-poznávací charakter. Realizovaný experimentálny program bol plánovaný na základe teoretických východísk, ktoré poskytujú komplexné informácie o výrobe oceľových bezšvíkových rúr z akosti určenej pre energetický priemysel.

5.1 Prínosy dizertačne práce pre prax

Prínosom práce je získanie nových poznatkov v oblasti výroby rúr pre energetický priemysel a to od technologicko-výrobného procesu, chemického zloženia, o vývoji a tvorbe mikroštruktúry ocelí pre energetický priemysel.

Za významné sú považované poznatky v oblasti:

- kvantifikácia procesu chladenia valcov,
- aplikácie metodiky nastavenia emisivity rôznych povrchov,
- predikcie veľkosti zrna pre dodržanie tranzitných teplôt,
- teploty transformačných premien austenitu vybraných ocelí,
- povrchové teploty valcov za procesu redukovania,
- povrchové teploty lupy a rúry počas procesu redukovania,
- rôzne simulačné štúdie určujúce možnosti nastavenie procesu valcovania,

5.2 Prínosy dizertačne práce pre vedu

Prínosom práce v oblasti vedy sú:

- metodika výpočtu veľkosti zrna po redukovaní,
- aplikácia metodiky pre stanovenie veľkosti zrna finálnej rúry do praxe,
- využitie prototypovej sondy pre presné stanovenie povrchovej teploty,
- aplikácia termografického merania v prevádzkových podmienkach,
- stanovenie hraničnej hodnoty povrchovej teploty valca z liatiny ale aj spekaného karbidu,

- stanovenie napäťovo-deformačných, termofyzikálnych a mechanických vlastností pre naplnenie okrajových podmienok pre modelovanie v numerických softvéroch.

5.3 Prínosy dizertačne práce pre pedagogiku

Všetky teoretické ako aj praktické výsledky sa môžu stať súčasťou odbornej literatúry a sú vhodné pre pedagogický proces výučby v oblasti tvárnenia, resp. valcovania bezšvíkových rúr ťahovým redukovaním. Uvedené výsledky sú vhodné aj na:

- aplikáciu do rôznych kvalifikačných prác o vplyve povrchovej teploty na valec z liatiny ale aj spekaného karbidu,
- rozšírenie poznatkov v oblasti tvárnenia a to hlavne v oblasti chladenia valcov a stanovenie ich povrchových teplôt.

ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

- [1] American society for, Manual on the use of thermocouples in temperature measurement“, Baltimore: STP 470 B, 1992.
- [2] ASTM International, *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*, West Conshohocken, 2012.
- [3] Slovenský ústav technickej dokumentácie, *Ocele - Metalografické stanovenie viditeľnej veľkosti zrna*, Bratislava: SUTN, 2012.
- [4] J. Balla, R. Mikuš a H. Cviková, *Návody na cvičenia*, 3 ed., Nitra: SPU, 2003, p. 162.
- [5] M. Pohanka a P. Kotrbáček, „Design of Cooling Units for Heat Treatment,“, Dr. Frank Czerwinski, 2012.
- [6] A. Bejan a D. Kraus, *Heat transfer handbook.*, J. Wiley, 2003.
- [7] F. P. Incropera a D. P. DE WITTT, *Fundamentals of heat and mass transfer.*, 3rd ed., New York: John Willey & Sons., 1990, p. 919.
- [8] J. Horský, „Experimentální stanovení okrajových podmínek pro numerické modely ochlazování a tváření kovů za tepla,“ VUT, Brno, 2002.
- [9] M. Kakhki, A. Kmeranpur a M. Golozar, „Numerical simulation of continuous cooling of a low alloy steel to predict microstructure and hardness,“ rev. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering 17*, 2009.
- [10] Y. Han, J. Shi, L. Xu, W. Q. Cao a H. Dong, „Effect of hot rolling temperature on grain size and precipitation hardening in a Ti-microalloyed low-carbon martensitic steel,“ rev. *Materials Science and Engineering*, 2012.

- [11] S. Reskovič, R. Krizanic a F. Vodopivec, „Numerical Design of a Hot-stretch-reducing Process for Welded Tubes,“ rev. *Materiali in tehnologije*, 2010.
- [12] K. Komorki a M. Suzuki, „Simulation of deformation and temperature in,“ *Journal of Materials Processing Technology*, %1. vyd.169, pp. 249-257, 2005.
- [13] M. Fujda, „Dilatometrické stanovenie teplôt fázovej premeny,“ TUKE, Košice, 2019.
- [14] P. Skočovský, O. Bokuvka, R. Konečna a E. Tillová, *Náuka o materiáli pre odbory strojnícke*, Žilina: EDIS, 2006.
- [15] J. Sloboda, M. Vršanský, J. Zimen a L. Beňušová, „Porovnávací skúška rozdielnych metód zit'ovania hodnôt vrubovej húževnatosti podľa STN EN ISO 148-1“.
- [16] G. H. Akbari, C. M. Sellars a J. A. Whiteman, „Microstructural development during warm rolling of an IF steel,“ *Acta Materialia*, zv. 45, %1. vyd.12, pp. 5047-5058, 1997.
- [17] L. Parilák, „Microstructural considerations limiting the mechanical properties of HSLA steel,“ rev. *Zlitine-technolgie* 30, Kovie, 1996.
- [18] L. Parilák, „Štruktúrna podstata mechanických vlastností a lomových vlastností materiálov,“ Ústav materiálového výskumu SAV Košice, Košice.
- [19] M. Pohanka, „Technical Experiment Based InverseTasks in Mechanics,“ Brno, 2006.
- [20] M. Raudenský, „Inverzní úlohy vedení tepla“, 1992.
- [21] A. N. Tikhonov a V. Y. Arsenin, *Solution of Ill-Posed problems*, Washington, D.C.: Winston, 1977.

- [22] F. Vode, B. Tehovnok, B. Arh, S. Smalej a B. Podgornik, „CALCULATION OF HEAT TRANSFER COEFFICIENTS,“ rev. *METALIRGIJA* , 2019.

PUBLIKAČNÁ ČINNOSŤ

ADE Vedecké práce v ostatných zahraničných časopisoch

- ADE01 KÁN, Michal - RIDZOŇ, Martin - MOJŽIŠ, Milan - TURŇA, Ján - PETERKA, Jozef - PARILÁK, Ľudovít. The influence of technological parameters for the manufacture of precision seamless tubes for automotive industry. In *Hutnik-Wiadomości Hutnicze*. Vol. 86, iss. 8 (2019), s. 250-252. ISSN 1230-3534. [Vnútrofakultná kategória: M*B].
- ADE02 MOJŽIŠ, Milan - RIDZOŇ, Martin - KÁN, Michal - ĎURČÍK, Roman - TURŇA, Ján - PARILÁK, Ľudovít. Microstructure aspects and comparison of mechanical properties of cold drawn precision seamless tubes. In *Hutnik-Wiadomości Hutnicze*. Vol. 86, iss. 8 (2019), s. 260-263. ISSN 1230-3534. [Vnútrofakultná kategória: M*B].
- ADE03 TURŇA, Ján - PARILÁK, Ľudovít - BUČEK, Pavol - MAŤAS, Pavol - KVAČKAJ, Tomáš - BÍLIK, Jozef. The comparison of cooling of two types of nozzles for roll cooling on selected stands in stretch reducing mill. In *Hutnik-Wiadomości Hutnicze*. Vol. 85, iss. 9 (2018), s. 319-321. ISSN 1230-3534. [Vnútrofakultná kategória: M*B].
- ADE04 TURŇA, Ján - PARILÁK, Ľudovít - BUČEK, Pavol - MATAŠ, Pavol - KVAČKAJ, Tomáš. Measurement of roll temperature in stretch reducing mill. In *Hutnik-Wiadomości Hutnicze*. Vol. 84, iss. 8 (2017), s. 380-382. ISSN 1230-3534. [Vnútrofakultná kategória: M*B].
- ADE05 TURŇA, Ján - RIDZOŇ, Martin - MOJŽIŠ, Milan - KÁN, Michal - PARILÁK, Ľudovít. The influence of reduction on the surface temperature in the process of drawing tubes. In *Hutnik-Wiadomości Hutnicze*. Vol. 86, iss. 8 (2019), s. 276-278. ISSN 1230-3534. [Vnútrofakultná kategória: M*B].

AEM Abstrakty vedeckých prác v zahraničných časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS

AEM01 ĎURČÍK, Roman - TURŇA, Ján - BUČEK, Pavol - PARILÁK, Ľudovít. Numerical modelling of heat transfer during stretch reducing of seamless steel tubes. In *Metalurgija. Metallurgy*. Vol. 57, no. 3 (2018), s. 207. ISSN 0543-5846 (2018: 0.388 - SJR, Q2 - SJR Best Q). [Vnútrofakultná kategória: M*D].

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

AFC01 TURŇA, Ján - PARILÁK, Ľudovít - MAŤAS, Pavol - KVAČKAJ, Tomáš - BÍLIK, Jozef. The cooling efficiency of two types of spray nozzles during hot rolling of tubes in stretch reducing mill. In *Metal 2018 : abstracts of the 27th international conference on Metallurgy and Materials. Brno, ČR, 23.-25. 5. 2018*. 1. vyd. Ostrava : Tanger Ltd, 2018, S. 495-500. ISBN 978-80-87294-83-3. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85059421879 ; WOS: 000461832200075. [Vnútrofakultná kategória: M*B].

AFC02 TURŇA, Ján - ĎURČÍK, Roman - BUČEK, Pavol - PARILÁK, Ľudovít - MAŤAŠ, Pavol. The comparison of measured surface temperature of roll in stretch reducing mill with a simulation of process. In *5th International Conference Recent Trends in Structural Materials, COMAT 2018*. 1. vyd. Bristol : IOP Publishing, 2018, S. 1-6. ISSN 1757-8981. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85059431903 ; DOI: 10.1088/1757-899X/461/1/012087. [Vnútrofakultná kategória: M*B].

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

AFD01 RIDZOŇ, Martin - MARTINKOVIČ, Maroš - MOJŽIŠ, Milan - TURŇA, Ján - DOMOVCOVÁ, Lucia - PARILÁK, Ľudovít. Possibilities of Stereological Analysis of Grain Boundary Orientation in Longitudinal Section of Precision Cold Drawn Seamless Steel Tubes. In *Materials Science Forum*. Vol. 891. International Symposium on Metallography and Materials Science, Metallography'16. Stará Lesná, 20. - 22. 04. 2016 (2017), s. 51-54. ISSN 0255-5476 (2017: 0.180 - SJR, Q3

- SJR BestQ). V databáze: SCOPUS: DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.891.51. [Vnútrofakultná kategória: M*B].

AFH Abstrakty príspevkov z domácich konferencií

AFH01 RIDZOŇ, Martin - MOJŽIŠ, Milan - MARTINKOVIČ, Maroš - TURŇA, Ján - DOMOVCOVÁ, Lucia - PARILÁK, Ľudovít. Stereological analysis of grain boundary orientation in longitudinal sections of precision cold drawn seamless steel tubes. In *Metallography'16 : 16th International Symposium on Metallography and Materials Science. 20th - 22nd April 2016 Stará Lesná, Slovak Republic. Abstract Booklet*. 1. vyd. [Košice] : [Technická univerzita], 2016, S. 68. ISBN 978-80-553-2547-7. [Vnútrofakultná kategória: M*D].

BEF Odborné práce v domácich zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)

BEF01 TURŇA, Ján - PARILÁK, Ľudovít - BUČEK, Pavol - MAŤAS, Pavol - KVAČKAJ, Tomáš. Porovnanie chladiaceho účinku troch typov dýz pri chladení profilových valcov ťahovej redukovne vo valcovni rúr ŽP a.s. In *Odborná konferencia ŽP VVC 2018 : Zborník príspevkov. Tále, 4.-6. september 2018*. 1. vyd. Podbrezová : ŽP VVC, 2018, S. 77-82. ISBN 978-80-973141-0-1. [Vnútrofakultná kategória: M*D].

BFA Abstrakty odborných prác zo zahraničných podujatí (konferencie...)

BFA01 TURŇA, Ján - MOJŽIŠ, Milan - RIDZOŇ, Martin - PARILÁK, Ľudovít. The effect of reduction and drawing force for surface temperature and mechanical properties of tubes in drawing process. In *EUROMAT 2019 : European congress and exhibition on advanced materials and processes, 1. - 5. september 2019, Stockholm, Sweden*. Stockholm : Swedish Society for Materials Tehnology, 2019, s. 1118. [Vnútrofakultná kategória: M*D].

SÚHRN

TURŇA, Ján: *Výskum procesu valcovania rúr pre energetický priemysel v podmienkach Železiarní Podbrezová*. [Dizertačná práca] – Slovenská technická univerzita v Bratislave. Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave; Ústav výrobných technológií. – Školiteľ: doc. Ing. Jozef Bílik, PhD. – Konzultant: prof. Ing. Ľudovít Parilák, CSc.- Trnava: MTF STU, 2021,. 111 strán.

Predmetom spracovania záverečnej práce je štúdium procesov tvárnenia, resp. valcovania za tepla v podmienkach ŽP a.s. V úvode práce bol realizovaný literárny a teoretický rozbor, kde je popísaná možnosť výroby rúr v podmienkach ŽP a.s. V experimentálnej časti je popísaný stručný návrh experimentu, možnosti technológie výroby rúr na prevádzke valcovňa rúr a jej výrobné obmedzenia. Ďalej sú v práci analyzované pevnostné a plastické vlastnosti vybraného experimentálneho materiálu. V oblasti mikroštruktúry boli v práci popísané vybrané stavy po valcovaní bezšvíkových rúr na ťahovej redukovni. V poslednej časti práci boli popísané možnosti využitia iných spôsobov k predikcii technologických parametrov pri valcovaní bezšvíkových rúr v ŽP a.s. V prvom prípade to bolo využitie numerických simulácií v DEFORM 3D, ANSYS, SimRoll, ďalej meranie povrchových teplôt materiálu a používaných nástrojov, určenie termofyzikálnych vlastností nástrojov a tiež koeficientu prestupu tepla.

Kľúčové slová: valcovanie bezšvíkových rúr za tepla, plastická deformácia za tepla, pevnostné a plastické vlastnosti, mikroštruktúra a jej predikcia, povrchová teplota, koeficient prestupu tepla, termofyzikálne vlastnosti valca, numerická simulácia, simulácia valcovacej kampane, prestup tepla, valcovacia kampaň,

ABSTRACT

TURŇA, Ján: *Research of production technology for hot rolled tubes for power engineering in Železiarne Podbrezová.*

[Dissertation] – Slovak University of Technology in Bratislava. Faculty of Materials Science And Technology in Trnava; Institute of Production Technologies. – Supervisor: doc. Ing. Jozef Bílik, PhD. – Consultant specialist: prof. Ing. Ľudovít Parilák, CSc.- Trnava: MTF STU, 2021,.111 pages.

The subject of this final thesis is the study of the forming processes, respectively hot rolling of the tubes under the conditions of the ŽP a.s. At beginning of the work is a literary and theoretical analysis carried out, which describes the possibility of production of tubes in ŽP a.s. The experimental part describes a design of the experiment, the possibilities of tube production in operation of the hot tube rolling and production limits. Furthermore, the strength and plastic properties of selected experimental material are analysed. In the field of microstructure, selected states after rolling seamless tubes on a stretch reducing mill were described in the work. In the last part of the work, the possibilities of a using other methods to predict technological parameters in the rolling of seamless tubes in ŽP a.s. In the first case, it was used of numerical simulation in Deform 3D, ANSYS, SimRoll, then measurement of surface temperatures of the material and tools used. The determination of thermo-physical properties of tools and also the heat transfer coefficient.

Keywords: hot rolling of seamless pipes, plastic deformation, strength and plastic properties, microstructure, microstructure prediction, surface temperature, heat transfer coefficient, thermo-physical properties of the roll, numerical simulation, rolling campaign simulation, heat transfer, rolling campaign,