

Recenzované výzkumné články

Analýza životnosti ponorných trubíc ZPO v Železiarňach Podbrezová, a. s.

Analysis of Service Life Period of the Submerged Entry Nozzles Used for Continuous Casting of Steel in Železiarne Podbrezová, a.s.

Ing. Vladimír Chomič¹; Ing. Stanislav Turňa¹; Ing. Matej²; Ing. Jozef Švantner²; Ing. Pavol Veselovský²; Ing. Marek Brižek²; prof. Ing. Ľudovít Parilák, CSc.¹

¹ ŽP Výskumno-vývojové centrum s.r.o., Kolkáreň 35, 97 681 Podbrezová, Slovenská republika

² Železiarne Podbrezová, a. s., Kolkáreň 35, 97681, Podbrezová, Slovenská republika

Prevádzka oceliarne podniku Železiarne Podbrezová, a.s. hľadá cesty pre zlepšenie ekonomických ukazovateľov a plánovania výroby na jednotlivé dni so zvýšením doterajších maximálne 15stavbových sekvencií odlievania oceli na 18stavbovú sekvenciu. Preto zadala riešenie úlohy životnosti ponorných trubíc medzipanvy u zariadenia plynulé odlievania ocele. Novo navrhnutou a prevádzkovo overenou metódou zistenia miesta najväčšieho opotrebenia ponorných trubíc pomocou jednoduchých a technicky nenáročných meraní bolo možné štatisticky posúdiť možnosti predĺženia maximálneho počtu odlievajúcich taviieb v jednej sekvencii. Následné rozsiahle štatistické analýzy merania hrúbky steny ponorných trubíc v mieste s najväčším opotrebovaním umožnili celý proces degradácie kvalitatívne i kvantitatívne opísať.

Kľúčové slová: plynulé odlievanie ocele; medzipanva; ponorná trubica; životnosť; hutnícka keramika

In steel plant Železiarne Podbrezová (ZP), 15-heat casting sequences have been considered optimal for continuous casting machine regarding both caster productivity and operational safety. This long-term practice was based on the observed service life of submerged entry nozzles (SENs) used for casting. Increasing the number of heats per casting sequence would cause caster productivity to increase considerably. Yet, the risk of nozzle failure has been a strong point against a possible increase in the number of heats per sequence. The research task was thus clear: by long-term measurement and statistical evaluation of material state and degradation of SENs used for continuous casting, determine a new safety margin for a maximum number of heats per sequence. The ultimate goal was to estimate the possibility of 18-heat sequences to be cast safely and reproducibly. This would not only increase the caster productivity but at the same time enhance the production planning process in ZP steel plant. The research method was based on statistical evaluation of key dimensions of hundreds of SENs; based on this, a model of SEN degradation process has been proposed. The results obtained confirm that the implementation of VK 00819-type SEN for casting of 10–15-heat sequences of 205R40 square billets in ZP steel plant is correct. Analysis of used SENs dimensions along with physical and chemical analyses unambiguously concludes that the primary parameter for an assessment of the SEN service life is the overall casting time, not the number of heats in a sequence; the latter being of secondary importance. Nevertheless, the research of SEN service life presented here is unique in the whole history of continuous casting in ZP steel plant. It gives us priceless statistical data for further research, including the confirmation/rejection of various hypotheses regarding SEN failure mechanisms, an assessment of the SEN service life and so on.

Key words: continuous casting of steel; tundish; submerged entry nozzle; lifespan; refractories

Dennú výrobu ocele v Železiarňach Podbrezová, a. s. (ŽP, a.s.) tvorí 21 až 22 taviieb, pričom pri odlievaní 18stavbových sekvencií je naplánovaná jednodňová produkcia tak, že sa odleje jedna krátka, max. 4stavbová a jedna dlhá, 18stavbová sekvencia. Pri výrobe niektorých značiek oceli u ktorých je potrebné použiť na legovanie väčšie množstvo prísad, dochádza z toho dôvodu ku skráteniu času potrebného na spracovanie v pánvovej peci LF. Preto ich odliavame max. ako štvortavby. Tieto

značky sú vyrábané za prítomnosti technologov, ktorí kontrolujú dodržiavanie technologických postupov. Pracujú iba v 1. zmene, a preto je výroba plánovaná tak, aby mohli byť prítomní pri spracovaní týchto taviieb. Skrátením počtu taviieb pri dlhých sekvenciách na maximálny počet 15 bolo potrebné do týždenného plánu výroby zaradiť viac kratších sekvencií. Tým sa znížila sekvenčnosť – množstvo taviieb odliatych bez prerušenia do jednej medzipánvy. Bolo nutné pripraviť na liatie viac

medzipánví, použiť viac pomocného materiálu, čo má negatívny dosah na ekonomické výsledky oceliarne ŽP, a.s. Z toho dôvodu boli štatisticky vyhodnotené všetky prípady zaťažovania a odtavenia ponorných trubíc (PT) a to od zavedenia príkazu odlievať maximálne 15tavbové sekvencie.

1. Ciele prevádzkového experimentálneho programu

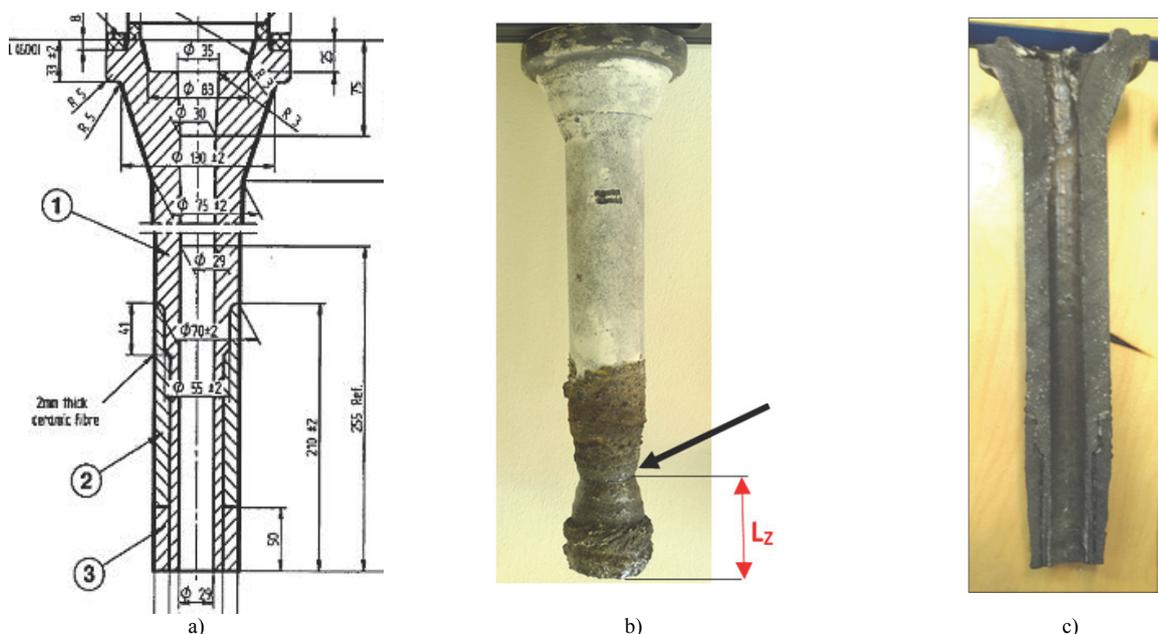
Za cieľ si riešiteľský kolektív stanovil určiť mieru degradácie PT vzhľadom na počet tavieb v sekvencii z pohľadu lejacieho prúdu a počtu tavieb v sekvencii a analyzovanie prípadov najväčších opotrebení, ktoré sú charakterizované extrémnou degradáciou hrúbky steny PT. Súčasťou riešenia bola kvantifikácia týchto prípadov a objasnenie ich príčiny pre konkrétny technologický proces.

2. Metoda hodnotenia životnosti ponorných trubíc

Merania degradácie PT boli realizované po ukončení liatia pre jednotlivé sekvencie, po zložení PT z kaziet posúvačových uzáverov a ich následnom vychladnutí v odkladacích stojanoch [2 – 10]. V tab. 1 sú znázornené hlavné parametre, ktoré boli merané a sledované. Zber a evidencia všetkých údajov súvisiacich s parametrami ovplyvňujúcimi životnosť PT pre vyrábané formáty sa realizuje nepretržite. Výkres použitej PT s presnými geometrickými parametrami znázorňuje obr. 1a. Obr. 1b uvádza konkrétne miesto merania sledovaných parametrov na PT. Navrhovaná metóda merania degradácie vnútorného a vonkajšieho priemeru steny PT sa jednoznačne osvedčila. Merania sú technicky aj časovo nenáročné. Hodnota L_z je definovaná, ako vzdialenosť miesta s najväčším opotrebovaním steny PT od výtokovej časti PT. Na obr. 1c) je zobrazený rez PT VK 00819, na ktorom je vidieť stav PT po odlíatí jednotlivej tavby.

Tab. 1 Sledované parametre opotrebovaných ponorných trubíc
Tab. 1 Monitored parameters of the worn out submerged entry nozzles

Por.	Dátum	č. tavieb od - do	Formát	Sekv.	Akosť	Typ Lp	Číslo prúdu	Typ PT	OD použitej PT (mm)
ID použitej PT (mm)	Vypočítaná hrúbka steny s nárastom (mm)	Hrúbka nárastu (mm)	Hrúbka steny bez nárastov vypočítaná (mm)	Min. hrúbka steny s nárastom odmeraná (mm)	Min. hrúbka steny bez nárastov odmeraná (mm)	Rozdiel medzi vyp. a odmeranou hrúbkou steny bez nárastov (mm)	Najväčšie opotrebenie od spodku PT (mm)	Čas odlievania [min.]	Pozn.



Obr. 1 a) Rozmery PT VK 00819; b) Opatrebovaná PT VK 00819; c) pozdĺžny rez VK 00819
Fig. 1 a) Dimensions of the SEN VK 00819; b) The worn-out the SEN VK 00819, c) Longitudinal section of SEN VK 00819

3. Dosiahnuté výsledky prevádzkového experimentu

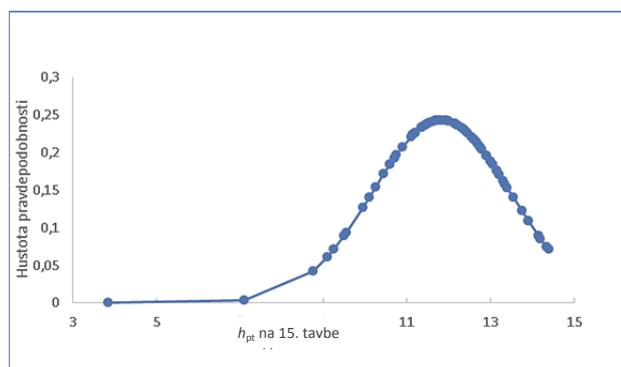
Na základe metódy popísanej v správe [1] bola sledovaná funkčnosť PT a miera ich degradácie opotrebovaním vnútorného a vonkajšieho povrchu. Takýmto spôsobom bolo vyhodnotených 295 kusov PT. V tab. 2 sú uvedené počty meraní parametrov PT pre jednotlivé prúdy a počty sekvencií v závislosti na množstve tavieb.

Tab. 2 Počty analyzovaných kusov PT VK 00819 pri jednotlivých prúdoch a sekvenciách, priečny prierez sochoru: kvadrát 205R40

Tab. 2 Number of the analysed VK 00819 SENS, cross section of billet: square 205R40

Počet hodnotených sekvencií na jednotlivých prúdoch pro VK00819							
Lejací prúd	Sekvencia	10 tavieb	11 tavieb	12 tavieb	13 tavieb	14 tavieb	15 tavieb
1.		11	9	17	12	25	31
2.		12	6	16	11	25	26
3.		11	8	16	10	25	24
Spolu		34	23	49	33	75	81
						SPOLU	295

V roku 2017 došlo v 10 prípadoch k zaťahovaniu s PT VK 00819. V šiestich prípadoch došlo k odtaveniu PT, z toho k deštrukcii steny PT v mieste L_z došlo u PT typu VK 00819 v troch prípadoch. Jedným z cieľov bolo stanovenie štatistickej významnosti vplyvu konkrétneho lejacieho prúdu na priemernú hrúbku steny PT. Prevádzkové výsledky ukázali, že vplyv lejacieho prúdu je štatisticky nevýznamný. Druhoradým cieľom bolo stanovenie výskytu prípadov extrémneho opotrebovania s využitím štatistického testu. Ako hrubé chyby boli definované všetky prípady opotrebovania, ktoré sa nachádzali mimo intervalu $\mu \pm 2\sigma$, kde μ označuje priemernú hrúbku steny a σ je smerodajná odchýlka normálneho rozdelenia pravdepodobnosti. (obr. 2) Nakoľko bolo uvažované iba s degradáciou hrúbky steny PT, ako hrubé chyby, boli definované iba záporné hodnoty. Štatistický test hrubých chýb stanovil početnosť extrémnych prípadov opotrebovania PT pre jednotlivé sekvencie (tab. 3). aj z pohľadu vplyvu chemického zloženia ocele. Aj v tomto prípade sa vplyv javí ako štatisticky nevýznamný.



Obr. 2 Hustota pravdepodobnosti zostatkovej hrúbky steny h_{PT}
Fig. 2 Function of the density of probability for normal distribution

Tab. 3 Počty meraní extrémnych prípadov opotrebovania pre jednotlivé sekvencie podľa chemického zloženia

Tab. 3 Number of extreme cases of SEN degradation according to chemical composition and given casting sequence

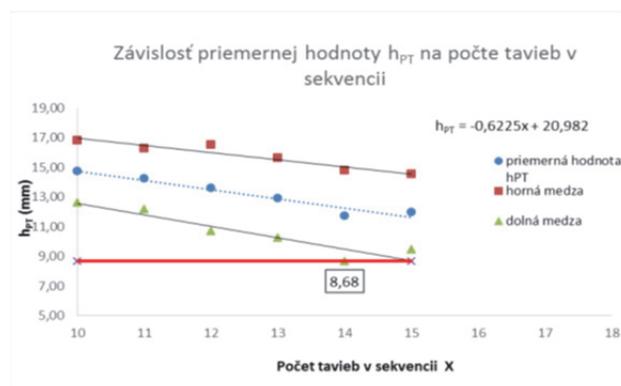
Vplyv chemického zloženia na počet vylúčených meraní pre kvadrát 205R40 a ponornú trubicu VK 00819								
Akosť	10	11	12	13	14	15	Spolu	% podiel
	tavieb	tavieb	tavieb	tavieb	tavieb	tavieb		
Akosti C < 0,18% a Mn < 1%	31	11	39	27	63	68	239	100,00
Počet vylúčených meraní	1	1	0	1	6	2	11	4,60
Akosti C > 0,18% a Mn > 1%	3	12	10	6	12	13	56	100,0
Počet vylúčených meraní	1	0	0	0	1	0	2	3,57
Všetky	34	23	49	33	75	81	295	100,00
Počet vylúčených meraní	2	1	0	1	7	2	13	4,41

Výsledky analýz degradácie 295 kusov PT preukázali, že 4okrem dvoch prípadov odtavenia PT nedošlo ani na jednom z lejacích prúdoch ZPO k strate funkčnosti PT. Analýzy [11] ukázali, že miera opotrebovania PT v jednotlivých sekvenciách má štatisticky charakter odpovedajúci Gaussovej krivke. Analýza hrubých chýb nameraných veličín (zameraná na prípady výrazného opotrebovania PT, t. j. dosiahnutí veľmi nízkych hodnôt h_{PT}) ukázala, že iba v 13 prípadoch došlo k výskytu „hrubých chýb“. Výnimkou sú sekvencie so 14 tavbami, kde v 7 prípadoch nastalo zrýchlené opotrebovanie PT (tab. 3). Fyzikáno-metalurgickými analýzami vyššie vymenovaných skutočností sa nepodarilo jednoznačne identifikovať príčinu zrýchleného opotrebovania PT. Aj v prípadoch zrýchleného opotrebovania PT totiž nedošlo k strate ich funkčnosti. Výskyt týchto prípadov však vedie k opatrnosti pri predikcii kritickej hodnoty opotrebovania PT. Po odstránení prípadov extrémneho opotrebovania PT (hrubých chýb) z analyzovaných súborov boli prepočítané nové výsledky, ktoré sú uvedené v tab. 4.

Tab. 4 Priemerné zostatkové hodnoty z nameraných dat

Tab. 4 Average residual values of the measured data

Priemerné výsledky zostatkových hodnôt hrúbky stien PT - VK 819 podľa sekvencií (po teste X^2)	10	11	12	13	14	15
Počet tavieb v sekvencii	10	11	12	13	14	15
Priemerná doba liatia	594,41	670,59	722,96	781,78	834,13	897,15
Priemerná hĺbka ponoru PT	106,47	100,86	107,76	108,19	109,09	115,90
Priemerná hrúbka steny [mm]	14,72	14,23	13,60	12,93	11,74	11,98
Max. hodnota [mm]	17,30	16,55	16,95	15,65	14,80	14,40
Min. hodnota [mm]	13,15	12,85	10,35	10,15	7,75	8,75
Smerodajná odchýlka [mm]	1,06	1,03	1,46	1,34	1,53	1,28
Rozptyl	1,11	1,06	2,14	1,79	2,34	1,64
Medián [mm]	14,40	14,18	13,65	12,93	11,88	12,00
Modus [mm]	14,65	16,00	14,40	12,80	13,15	12,90
Dolná medza [mm]	12,61	12,17	10,68	10,26	8,68	9,43
Horná medza [mm]	16,83	16,29	16,52	15,61	14,81	14,54
Kritická medza [mm]					8,68	
Počet tavieb v sekvencii kritický					15	19,76



Obr. 3 Závislosť vyhodnotených priemerných hodnôt h_{PT} na počte tavieb v sekvencii

Fig. 3 Dependence of the average h_{PT} value on the number of heats per sequence

Obr. 3 uvádza analýzu popisujúcu priemerné hodnoty h_{PT} pre jednotlivé sekvencie s rozptylovým pásmom týchto hodnôt (hornou, resp. dolnou medzou h_{PT}). V prvom priblížení sa môže za spoľahlivú hodnotu funkčnosti PT predpokladať hrúbka steny 8,68 mm, čo je hodnota tzv. dolnej medze pri 14tavbovej sekvencii. Extrapoláciou odvodennej funkcie pre priemernú hrúbku steny h_{PT} by sa hodnota 8,68 mm dosiahla po cca 19 tavbách. Tejto úvahe odpovedá predpoklad, že celkové opotrebovanie PT v kritickom mieste O_{PT} môže dosiahnuť hodnotu až 12 mm. Z pohľadu analýzy vplyvu doby liatia na opotrebovanie PT by sa táto hodnota opotrebovania dosiahla po cca 1200 minútach. Následne boli analyzované závislosti opotrebovania hrúbky stien PT od jednotlivých faktorov. Doba liatia je v našom prípade veľmi dôležitá, lebo len pri optimálnych rýchlostiach liatia je možné uvažovať len s počtom tavieb v sekvencii. V prípade znižovania liacich rýchlostí sa doba pobytu ocele v PT predĺži a dôjde k jej väčšiemu opotrebovaniu

4. Záver

Bola navrhnutá a overená metóda hodnotenia najväčšieho opotrebovania PT formou merania vzdialenosti miesta maximálneho úbytku hrúbky steny ponorných trubíc od ich ústí do oceleovej taveniny. Následné rozsiahle štatistické analýzy merania hrúbky steny PT v mieste s najväčším opotrebovaním h_{PT} umožnili celý proces degradácie kvalitatívne i kvantitatívne opísať. Dosiagnuté výsledky jednoznačne potvrdzujú správnosť implementácie PT VK 00819 pri odlievani kontislitkov formátu 205 R40 v ŽP, a. s., a to pre všetky 10 až 15tavbové sekvencie. Z predložených výsledkov a z fyzikálno-chemického hľadiska opotrebovania PT jednoznačne vyplýva, že pre hodnotenie životnosti PT je určujúcim parametrom celková doba liatia a až v druhom rade počet tavieb. Výskum životnosti PT medzipanvy ZPO bol svojím rozsahom v ŽP, a. s. unikátny a jeho výsledkom je cenná štatistika pre ďalší výskum v danej oblasti, prijímanie alebo zavrhovanie hypotéz príčin poškodenia, odhady životnosti apod. Po realizovaní prevádzkového experimentu boli stanovené dve odporúčania.

- 1) Pri opatrnom prístupe zvýšiť maximálny počet odlievaných tavieb v jednej sekvencii na 16 a v prípade pozitívnych výsledkov postupne zvyšovať sekvenčnosť o jednu tavbu, čiže 17.
- 2) Pripúšťame možnosť realizácie novej overovacej skúšky, kde by sa v sekvencii odlievali až 18 tavieb, tak ako bol stanovený cieľ výskumu. Táto skúška by samozrejme zvyšovala mieru rizika výskytu straty funkčnosti PT v priebehu liatia.

Pod'akovanie

Tento príspevok vznikol ako súčasť riešenia výskumnej úlohy ŽP VVC s.r.o.: *Optimalizácia riadenia plynulého odlievania ocele – OPTICON.*

Literatúra

- [1] PARILÁK, L., TURŇA, S., CHOMIČ, V. Štatistické vyhodnotenie životnosti ponorných trubíc medzipanvy ZPO za účelom možnosti zvýšenia sekvenčnosti – 1. etapa. (Výskumná správa č. 2/ŽPVVC/2017) Podbrezová: ŽP VVC s.r.o. 2017.
- [2] BUČEK, P. et al. Optimalizácia riadenia plynulého odlievania ocele – OPTICON. Téma 3: Expertízy pre Vo ŽP, a. s. v oblastiach primárnej a sekundárnej metalurgie, plynulého odlievania ocele a hutnickej keramiky [Optimisation of control of continuous casting of steel – OPTICON. Theme 3: Expertise for Vo ŽP, a.s. with. in the fields of primary and secondary metallurgy, continuous casting of steel and metallurgical ceramics] (VÚ ŽP VVC č. 6/2018, návrh VÚ 6 na rok 2018), Podbrezová: ŽP VVC, a.s., 2018.
- [3] MICHÁLEK, K., TKADLEČKOVÁ, M., GRÝC, K., CUPEK, J., MACURA, M. Physical and Numerical Modelling of a Non-stationary Steel Flow through a Subentry Shroud with an Inner Metering Nozzle. *Materiali in tehnologije*, Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, 47 (2013) č. 6, s. 807-814. ISSN 1580-2949.
- [4] OGIBAYASHI, S., et al. Mechanism and Countermeasure of Alumina Buildup on Submerged Nozzle in Continuous Casting. In: *75th ISS Steelmaking Conf.*, Toronto, Canada, April 1992.
- [5] LONG, M., ZUO, X., ZHANG, L., CHEN, D. Kinetic Modeling on Nozzle Clogging during Steel Billet Continuous Casting, *ISIJ International*, 50 (2010) 5, 712
- [6] STAROŇ, J., TOMŠŮ, F. Žiaruvzdorné materiály; výroba, vlastnosti a použitie. Banská Bystrica: MEDIA, 2000, 148 s.
- [7] SVENSSON, J. K. S., MEMARPOUR, A., BRABIE, V., JÖNSSON, P. G. Studies of the Decarburisation Phenomena during Preheating of Submerged Entry Nozzles (SEN) in Continuous Casting Processes. *Ironmaking and Steelmaking*, 44 (2017) 2, 108.
- [8] TOULOUSE, C., PACK, A., ENDER, A., PETRY, S. Stable Oxygen Isotopes for Tracing the Origin of Clogging in Continuous Casting Submerged Entry Nozzles. *Steel Research International*, 79 (2008) 2, 149.
- [9] TSUKAMOTO, N., et al. Improvement of Submerged Nozzle Design Based on Water Model Examination of Tundish Slide Gate. In: *74th ISS Steelmaking Conf.*, Washington, D.C., April 1991.
- [10] SVENSSON, J. K. S., MEMARPOUR, A., EKEROT, S., BRABIE, V., JÖNSSON, P. G. Studies of New Coating Materials to Prevent Clogging of Submerged Entry Nozzle (SEN) during Continuous Casting of Al Killed Low Carbon Steels. In: *Ironmaking and Steelmaking*, 44 (2017) 2, 117.
- [11] PARILÁK, L., TURŇA, S., CHOMIČ, V., BRIŽEK, M., ŠVANTNER, J., VESELOVSKÝ, P., BRENKUS, M. Analýza životnosti ponorných trubíc medzipanvy v ŽP a. s. – 2. etapa (Výskumná správa č. 13/ŽPVVC/2017), Podbrezová: ŽP VVC, a.s., 2017.