

## Studium vnášení legující přísady bizmutu do taveniny automatové oceli v podmínkách atmosférické indukční tavicí pece

### Study of Alloying Bismuth Additive into the Melt of Free-cutting Steel in Conditions of Atmospheric Induction Melting Furnace

Ing. Vladislav Kurka, Ph.D.; Ing. Jaroslav Pindor, Ph.D.; doc. Ing. Petr Jonšta, Ph.D.; Dr. Ing. Zdeněk Kuboň

MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o., Pohraniční 693/31, 703 00 Ostrava-Vítkovice, Česká republika

*Strojní opracování součástí vyžaduje z hlediska ceny a rychlosti opracování dobrou lámavost třísky, včetně jejího rychlého odvodu a zachování všech potřebných pevnostních charakteristik materiálu. V této publikaci je popsán vývoj technologie výroby automatové oceli určené k cementování s obsahem běžných legujících přísad. Práce popisuje technologii vnášení legující přísady bizmutu, který zlepšuje obrobitelnost oceli. Tato technologie byla ve společnosti MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o. navržena a ověřována na experimentálních tavných na atmosférické indukční tavicí peci s odlitím ingotů.*

**Klíčová slova:** bizmut; ocelová tavenina; legování; automatová ocel

*Machined parts require good chip breakage in terms of cost and machining speed, including fast chip removal and preservation of all necessary material strength characteristics. Steel with the content of sulphur, phosphorus and lead additions is currently used for this purpose. A replacement for the lead alloy is sought, which will have the same effects on chip breakage while preserving other properties. One of these alloying additives is bismuth, and this work describes the study of adding this alloy into experimental steel melts. The work is focused on the description of the technology that deals mainly with adding of alloying bismuth additive, which improves workability. The technology was designed and verified in the company MATERIAL AND METALLURGICAL RESEARCH Ltd. on experimental melts in an atmospheric induction melting furnace with a nominal melt weight of 350 kg followed by bottom casting of the melt into ingots. It was proposed to alloy the steel melt to three levels of Bi content, which was successful and the resulting contents were: 0.00 % Bi, 0.08 % Bi and 0.12 % Bi. Experiments have shown that in the case of production of small melts (low weight) it is best to alloy Bi directly into the stream of the melt cast from the atmospheric induction melting furnace into the ladle. The efficiency of the alloying with Bi into the steel melt in an atmospheric induction melting furnace is 3.3 %. When alloying Bi into the steel melt stream cast into the ladle, the alloying efficiency of Bi is 9.8 – 15.2%.*

**Keywords:** bismuth; steel melt; alloying; free-cutting steel

Rostoucí potřeba rychlé, jednoduché a bezproblémové výroby dílů třískovým obráběním, především pro automobilový průmysl, a zároveň snaha o snížení ceny konečných produktů si vyžaduje hledání nových alternativních materiálů či modifikaci stávajících. Pro třískové obrábění se využívají materiály s dobrou lámavostí třísky, kterou v materiálu zajišťuje přídavek olova. Při výrobě materiálu v metalurgických agregátech vyžaduje legování olova velmi přísné hygienické podmínky, které představují odsávání haly a přilehlých prostor, pravidelná kontrola a čištění pracovního prostředí, a především pravidelné lékařské prohlídky pracovníků metalurgických agregátů a pomocných pracovníků. Olovo se totiž řadí mezi karcinogenní prvky [1]. V této práci se budeme zabývat vývojem materiálu legovaného bizmutem, který se jeví jako vhodná potenciální náhrada za olovo.

Ve společnosti MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o. byly provedeny experimentální tavyby s legováním bizmutu do taveniny automatové oceli.

Studiu legování ocelové taveniny byla podrobena automatová ocel (dále jen ocel) s obsahem 0,20 % C, 1,30 % Mn, 0,10 % Si, 1,15 % Cr, která byla legována na tři úrovně obsahu Bi: a) 0,00 % Bi, b) 0,08 % Bi, c) 0,12 % Bi.

Ke studiu vlivu legování na obrobitelnost oceli byla použita legující přísada Bi s obsahem  $\text{CaCO}_3$  v poměru 93 % Bi a 7 %  $\text{CaCO}_3$ , tedy ve stejném poměru, který běžně využívají metalurgické výrobní společnosti a který je pro ně běžně relativně dostupný. Směs Bi a  $\text{CaCO}_3$  byla v podobě prášku zalisována do plněného kovového profilu (obr. 1) s obsahem 707 g směsi legující přísady na 1 m délky.

Studium vlivu legování Bi na obrobiteľnosť oceli bolo vo spoločnosti MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o. provedeno na atmosférické indukční tavicí peci (dále jen IP) s nominální hmotností vsázky 350 kg.



Obr. 1 Plněný profil legující přísady Bi/CaCO<sub>3</sub>  
Fig. 1 Xored wire containing the alloy Bi/CaCO<sub>3</sub>

## 1. Studium legování Bi

Experimentální legování bizmutu to taveniny oceli bylo provedeno dvojím způsobem: nejprve do vlastní IP a poté do lící pánve při odlévání taveniny z IP.

Bylo provedeno dvanáct experimentů legování taveniny, z nichž se podařilo finálně dokončit šest. Zde je představeny výsledky pouze šesti dokončených taveb. V těchto šesti experimentech bylo provedeno legování bizmutu na hodnoty uvedené v tab. 1 pomocí plněného profilu přidávaného do proudu taveniny odlévané z IP do lící pánve.

Vnášení legující přísady Bi do taveniny oceli v IP znázorňuje obr. 2. Na tomto obrázku tavič ručně tlačí plněný profil s Bi na dno kelímku a přitom využívá maximální ferostatický tlak k rozpuštění Bi. Plněný profil obsahoval Bi, který má dle [2] teplotu varu cca 1559 °C, byl smíchaný s CaCO<sub>3</sub>, jež má teplotu varu 899 °C [3]. Nízká teplota varu CaCO<sub>3</sub> vyžaduje větší ferostatický tlak taveniny oceli, takže se zajistí plné využití CaCO<sub>3</sub> pro následnou dezoxidaci taveniny. Vzhledem k malé hloubce taveniny v kelímku IP se legování přímo do kelímku projevovalo jakožto velmi neúčinné. Jeho výtěžnost

dosahovala jen 3,3 % (viz 1. experiment v tab. 1). S takto nízkou účinností se podařilo nalegovat ocel na 0,02 % Bi. Obsah Bi v tavenině byl analyzován ze vzorku kovu odebraného z IP cca 5 minut po nalegování taveniny. Odstup 5 minut byl zvolený z důvodu zachování časové prodlevy, která simulovala čas potřebný na odlití taveniny z IP do lící pánve, převoz taveniny nad lící pole, přípravu lící pánve pro odlévání a začátek odlévání.



Obr. 2 Legování Bi přímo do kelímku indukční tavicí pece  
Fig. 2 Adding Bi directly into the crucible of the induction melting furnace

Z důvodu vysokého propalu Bi při legování v IP bylo přistoupeno k legování Bi přímo do lící pánve (obr. 3). Lící pánve svou výškou hladiny vytvoří sice stejný ferostatický tlak jako IP, ale zvýšeným dynamickým prouděním taveniny lze předpokládat zvýšení účinnosti legování Bi i do velmi malého obsahu taveniny.

Při legování Bi do proudu taveniny odlévané z IP do lící pánve dochází, jak ukazuje obr. 3, k vývinu velkého množství žlutého kouře, pravděpodobně zplyněného bizmutu.



Obr. 3 Legování Bi do proudu taveniny odlévané z atmosférické indukční tavicí pece do lící pánve  
Fig. 3 Adding Bi into the stream of melt casted from the the induction melting furnace

Tab. 1 Hodnoty obsahu Bi v experimentálních tavnách  
Tab. 1 Values of Bi contents in experimental melts

		Označení experimentu						Jednotky
		1.	2.	3.	4.	5.	6.	
<b>Způsob legování do</b>		IP	Licí pánve	Licí pánve	Licí pánve	Licí pánve	Licí pánve	-
<b>Hmotnost tavby</b>		377,5	361,3	435,6	322,8	334,9	312	[kg]
<b>Hmotnost legující přísady</b>	<b>celkem Bi a CaCO<sub>3</sub></b>	2,460	3,535	3,535	3,535	-	1,768	[kg]
	<b>přepočtený obsah Bi ve směsi</b>	2,288	3,288	3,288	3,288	-	1,644	[kg]
<b>Obsah Bi v tavenině</b>	<b>teoreticky vypočtený</b>	0,606	0,910	0,755	1,018	-	0,527	[%]
	<b>skutečný</b>	0,020	0,120	0,100	0,100	0,003	0,080	[%]
<b>Účinnost legování Bi = skutečný/teoretický</b>		3,3	13,2	13,2	9,8	-	15,2	[%]

Vyhodnocení pěti experimentů označených č. 2 až 6, kde byla tavenina legována pomocí Bi do LP, je uvedeno v tab. 10. Z ní je patrné, že účinnost legování Bi se u jednotlivých taveb odlišuje a pohybuje se od 9,8 do 15,2 %. To můžeme ve srovnání s hodnotami dosahovanými u velkých metalurgických výrobních společnostech označit za velmi nízkou účinnost. Velcí výrobci totiž dosahují účinnost legování Bi do licí pánve kolem 50 – 60 %. Použitím větších agregátů (licí pánve) s větším objemem tavby, a tedy i výškou hladiny tavby, využívají větší ferostatický tlak roztavené oceli.

Experimentální tavby ukázaly, že při legování Bi do taveniny v IP je účinnost cca 5× nižší než při legování do proudu odlévané taveniny v licí pánvi.

Tavenina legovaná bizmutem byla ihned převezena na atmosférické odlévací pole, kde byla odlita přes hubičku z licí pánve do licího kůlu, který spodem plnil dvě kokily o kruhovém průřezu (obr. 4). I přes malý objem taveniny odlévaný do kokil, musely být ingoty odlévány cca stejnou rychlostí jako větší ingoty. Důvodem bylo zachování rychlosti proudění v licích kanálcích z důvodu jejich prohřátí taveninou, tj. aby v nich tavenina nezamrzla. Příklad odlitého ingotu z tavby s 0,12 % Bi z experimentu č. 2 je uveden na obr. 5.

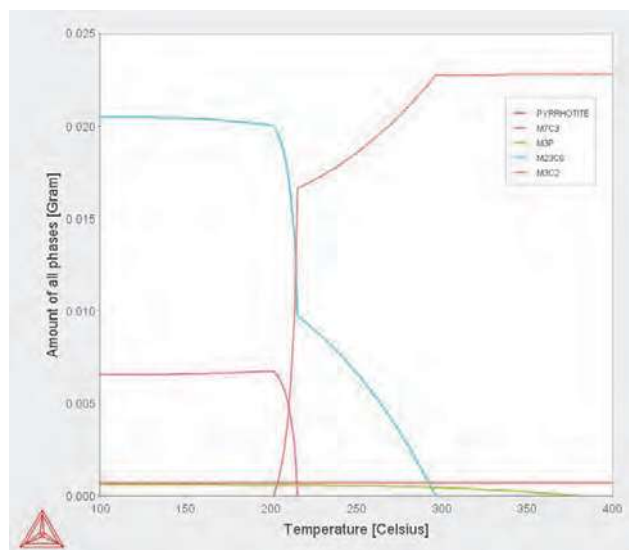


Obr. 4 Odlévání taveniny oceli z licí pánve, spodem do předem připravených kokil  
Fig. 4 Bottom casting of molten steel from pouring ladle into the prepared ingot moulds



Obr. 5 Odlitý ingot z oceli s 0,12 % Bi  
Fig. 5 Ingot cast from steel with 0.12 % Bi

V tavnách s obsahem bizmutu 0,12 %, který je nejvyšší ze všech provedených experimentů, nastaly při vyhodnocování obavy, že by mohlo dojít k vylučování Bi v jiných strukturních fázích. Proto bylo provedeno šetření na možné vylučování Bi, konkrétně v softwaru Thermocalc (obr. 6). Strukturní rozbor podle obr. 6 ukázal, že bizmut se v celém průběhu tuhnutí nevylučuje v žádné fázi. Svědčí o tom průběh křivky M3P, která dosahuje téměř nulové hodnoty v celém teplotním rozsahu 0 – 1600 °C. Na obr. 6 je znázorněn výřez jen pro rozsah 100 – 400 °C závěry ze stěžejního obrázku pro myšlenku transformace nebo netransformace Bi do strukturních fází.



Obr. 6 Podíl vznikajících fází během tuhnutí oceli s 0,12 % Bi podle softwaru ThermoCalc

Fig. 6 Fraction of the phases formed during solidification of steel with 0.12 % Bi according to software ThermoCalc

## 2. Závěr

Předmetná práce se zabývala studiem možnosti legování ocelové taveniny v podmínkách atmosférické indukční tavicí pece o nominální hmotnosti taveniny 350 kg. Bylo požadováno legovat taveninu oceli na tři úrovně obsahu Bi, což se podařilo a výsledné obsahy činily: 0,00 % Bi, 0,08 % Bi a 0,12 % Bi.

Provedené experimenty prokázaly, že při výrobě malých taveb je nejvhodnější legování Bi přímo do proudu

taveniny odlévané z atmosférické indukční tavicí pece do lící pánve.

Účinnost legování Bi do taveniny oceli v atmosférické indukční tavicí peci činí 3,3 %. Při legování Bi do proudu taveniny odlévané do lící pánve je účinnost legování Bi násobně vyšší a dosahuje hodnot 9,8 – 15,2 %.

### Poděkování

Tato práce vznikla v rámci čerpání a užití institucionální podpory na Dlouhodobý a koncepční rozvoj výzkumné organizace v roce 2019, poskytovatel Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky.

### Literatura

- [1] OTTP, M., MÜHLENDahl, K.E. Olovo. Dostupné online: <http://www.allum.de/toxickelatky/olovo> [cit. 2019-12.02].
- [2] CAHILL, J.A., KIRSHENBAUM, A.D. The density of liquid bismuth from its melting point to its normal boiling point and an estimate of its critical constants. *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry*. 25 (1963) 5, 501–506. Dostupné online: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/002219026380233X>
- [3] CaCO<sub>3</sub> - Calcium carbonate. Dostupné online: <https://byjus.com/chemistry/caco3/>
- [4] NAZABAL, J.L., URCOLA, J.J., FUENTES, D.M. Hot Ductility of Lead Free-Cutting Steels. *Metallography*. 17 (1984), 439–454.
- [5] LIU, H.T., CHEN, W.Q. Hot Ductility of Eco-friendly Low Carbon Resulphurised Free-cutting Steel with Bismuth. *Ironmaking & Steelmaking*, Jan. 2014, 41 (2014) 1, 19–25. DOI: 10.1179/1743281212Y.0000000095.
- [6] KIM, M.S., LII, H.J., CHANG, Y.W. The Effect of Mn/S Ratio on Hot Ductility of Bi Bearing Free-cutting Steels. *Key Engineering Materials*, 345-346 (2007), 169-172. Dostupné online: [www.scientific.net](http://www.scientific.net) [cit. 2007-08-15].

## Kovací soubor pro ruský trh

Společnosti ŽĎAS ze Žďáru nad Sázavou se podařilo koncem roku 2019 dosáhnout dalšího úspěchu na ruském trhu, když došlo k podpisu kontraktu na dodávku kovacího souboru v hodnotě převyšující 140 milionů korun.

Akciová společnost ŽĎAS podepsala v uplynulých dnech kontrakt na dodávku kovacího souboru se společností z města Kolpino, které leží jihovýchodně od Petrohradu. Jedná se o další kontrakt v pořadí, který se podařilo společnosti v Rusku dojednat. „Nejen díky těmto úspěchům se potvrzuje, že společnost ŽĎAS patří ke špičkám ve strojírenském oboru a dokáže uspět i ve velmi silné světové konkurenci. Aby tomu bylo i nadále, je naší prioritou podporovat rozvoj firmy a jejich technologií,“ zhodnotil Roman Náhončík, výkonný viceprezident společnosti CITIC Europe Holdings a.s., do jejíhož portfolia ŽĎAS spadá.

Z hlediska technické specifikace půjde o kovací soubor s hydraulickým lisem CKV 1250/1600, kolejovým manipulátorem QKK 8 NK a otočnými stoly QHZ 8 a QWK 4. Po delší době se jedná o komplexní dodávku kovacího zařízení na ruský trh. „Se zákazníkem z Kolpina budujeme dlouhodobé partnerské vztahy, již historicky jsme zde realizovali modernizace kovacího zařízení a manipulátorů a na základě dobré technologické i servisní zkušenosti s naší společností, si zákazník vybral právě nás,“ uvedl generální ředitel společnosti ŽĎAS Pavel Cesnek. „V tomto roce vidíme velký nárůst investičních příležitostí v tomto teritoriu, intenzivně pracujeme na mnoha projektech jak ve standardní výrobní nomenklatuře firmy ŽĎAS, tak také například v energetickém segmentu.“

– Z tiskové zprávy říjen 2019 –