

**CONTRIBUȚIE LA REDUCEREA  
EMISIILOR DE GAZE CU EFECT  
DE SERĂ DIN INDUSTRIA OȚELULUI**

**CONTRIBUTION TO THE REDUCTION OF  
GREENHOUSE GASES EMISSIONS  
IN THE STEEL INDUSTRY**

**L. PĂUNESCU<sup>1</sup>, N. ANGELESCU<sup>2</sup>, J. BARROSO DE AGUIAR<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>CERMAX 2000 PATENTS SRL București

<sup>2</sup>Universitatea Valahia, Târgoviște, România

<sup>3</sup>University of Minho, Guimaraes, Portugal

**Person contact: lucian.paunescu.cermax@gmail.com**

---

**REZUMAT / ABSTRACT**

**L**ucrarea prezintă o importantă contribuție a colectivului de autori la diminuarea emisiilor de gaze cu efect de seră din domeniul siderurgiei.

Datorită aplicării soluțiilor tehnice de scădere a pierderilor de căldură prin căptușeala refractară a oalelor de turnare de la ArcelorMittal Galați, se reduce consumul de oxigen industrial al convertizoarelor, produs cu un aport important de energie electrică.

Astfel, a fost realizat, testat în laborator și, apoi, pe un model experimental, un nou material refractar monolitic superaluminos, cu dozaj redus de ciment, refractaritate și rezistență mecanică ridicate și, în același timp, cu porozitate suficient de scăzută, care asigură o importantă reducere a conductivității termice comparativ cu materialul înlocuit și, implicit, diminuarea pierderilor de căldură ale oțelului în oala de turnare.

Datorită economiei de energie electrică pentru supraîncălzirea oțelului în convertizor, protecția mediului este favorizată, prin reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră cu  $1,3 \cdot 10^3$  t CO<sub>2</sub>/an.

**T**he paper presents an important contribution of the team of authors to reduction the greenhouse gases emissions in the iron and steel industry.

Due application of technical solutions of heat losses reduction through the refractory lining of ladles in ArcelorMittal Galati, is reduced the industrial oxygen consumption of converters, made with an important contribution of electricity.

Thus, it was achieved, tested in laboratory and, then, on an experimental model, a new refractory monolithic superaluminous material, with a low cement dosage, high refractoriness and mechanical strength and, simultaneously, low enough porosity to assure an important reduction of thermal conductivity compared to substituted material and, implicitly, decrease of heat losses in the steel ladle.

Due electricity economy to overheating of the steel in converter, the environment protection is favored by the greenhouse emissions reduction with  $1.3 \cdot 10^3$  t CO<sub>2</sub>/year.

Keywords: concrete, thermal conductivity, experimental model, low cement dosage, greenhouse gases

**1. INTRODUCERE**

Măsurătorile de temperatură efectuate la oale de turnare a oțelului din ArcelorMittal Galați [1] au identificat veriga slabă a structurii căptușelii refractare, aceasta fiind stratul intermediar realizat din dolomită granulată liată cu gudron, care are coeficientul de transfer de căldură prin conductivitate

**1. INTRODUCTION**

The measurements of temperature carried out at ArcelorMittal Galati steel ladles [1] have identified the weak link of refractory structure, this being the intermediate layer made of granulated dolomite bounded with tar, which has the coefficient of heat transfer by thermal conductivity of 4.11-4.75 W/m·°C,

termică de 4,11-4,75 W/m<sup>2</sup>·°C, dublu față de materialele care formează celelalte straturi (cărămizi magnezio - spinelice sau blocuri dolomitice, ca strat de uzură și cărămizi silico - aluminoase sau beton refractar BR 90, ca strat permanent).

Pierderile de căldură ale oțelului topit prin căptușeala refractară a oalelor a condus fie la grăbirea operațiilor de turnare la instalația de turnare continuă, fie la supraîncălzirea oțelului în convertizor cu consum suplimentar de oxigen industrial și, implicit, de energie electrică pentru producerea acestuia.

Astfel, cercetările au fost orientate spre realizarea unui nou material monolitic refractar cu caracteristici fizice și structurale corespunzătoare rolului acestuia în structura căptușelii refractare a oalelor și, în același timp, cu conductivitate termică redusă pentru a asigura o mai bună conservare a energiei termice a oțelului topit în oală.

## 2. DESCRIEREA LUCRĂRILOR EFECTUATE

### 2.1. Proiectarea, realizarea și caracterizarea în laborator a unui nou material monolitic refractar pentru stratul intermediar al căptușelii oalelor de turnare a oțelului

Având în vedere caracteristicile mecanice și refractaritatea remarcabile ale betoanelor cu dozaj redus de ciment (5-10%, comparativ cu media de 20% a dozajelor uzuale) au fost adoptate trei variante de betoane superaluminoase cu dozaje de ciment de 9; 7,5 și 6%.

Probele realizate pentru cele trei variante de betoane au fost caracterizate fizic și chimic în laborator. Rezultatele testelor au arătat posibilitățile de obținere a unor rezistențe la compresiune foarte înalte, concomitent cu diminuarea dozajului de ciment de la 9 la 6% (între 61,6 și 79,5 MPa după arderea materialului la 1500°C) [2-6]. Refractaritatea betoanelor crește de la 1830 IP la 1870 IP, în același timp cu diminuarea dozajului de ciment, dar și conductivitatea termică are o evidentă tendință de creștere (de la 1,9 la 2,5 W/m<sup>2</sup>·°C, după ardere la 1500°C) datorită pronunțatei creșteri a compactității structurale și uniformității, care caracterizează matricea microstructurală a betoanelor cu dozaj redus de ciment [7-9].

Ca urmare a rezultatelor obținute, s-a ajuns la concluzia că, pe de o parte, valorile obținute ale rezistenței la compresiune sunt mai mari decât valorile necesare ale materialului din stratul intermediar al căptușelii oalei și, pe de altă parte, este necesară o scădere a conductivității termice (sub 2,5 W/m<sup>2</sup>·°C).

Astfel, s-a adoptat soluția înlocuirii parțiale (20-40%) a agregatului obișnuit al betoanelor superaluminoase cu înaltă refractaritate (alumina tabulară), cu un

*double compared to materials that make up the neighboring layers (magnesia - spinel bricks or dolomite blocks, as working layer and silica - aluminous bricks or refractory concrete BR 90, as permanent layer).*

*The heat losses of molten steel through ladles refractory lining led to either the acceleration of casting operations at the continuous casting station, or the overheating of steel in converter with additional consumption of industrial oxygen and, implicitly, of electricity for its manufacture.*

*Thus, research has been focused to realize a new refractory monolithic material with physical and structural characteristics corresponding its role in the structure of refractory lining of ladles and, simultaneously, with a low thermal conductivity, to assure a better conservation of molten steel thermal energy in ladles.*

## 2. DESCRIPTION OF THE PERFORMED WORKS

### 2.1. Design, realization and characterization in laboratory of a new monolithic refractory material for the intermediate layer of steel ladles lining

*Given the remarkable mechanical characteristics and refractoriness of concretes with low dosage of cement (5-10%, compared to the average of 20% of usual dosages), were adopted three variants of super aluminous concretes with cement dosage of 9; 7.5 and 6%.*

*The samples made for the three concretes variants were physical and chemical characterized in laboratory. The tests results showed the possibilities to obtain very high compression strengths, simultaneously with the reduction of cement dosage from 9 to 6% (between 61.6 and 79.5 MPa, after the burning of material at 1500°C) [2-6]. The refractoriness of concretes increases from 1830 IP to 1870 IP, simultaneously with the reduction of cement dosage, but the thermal conductivity has, too, an obvious trend of increasing (from 1.9 to 2.5 W/m<sup>2</sup>·°C, after burning at 1500°C) due the pronounced increase of structural compactness and uniformity, that characterizes the concretes microstructural matrix with low cement dosage [7-9].*

*Following the results, it has been concluded that, on the one hand, the compression strength values are higher than the required values of the material from the intermediate layer of ladle lining and, on the other hand, it is necessary a decreasing of the thermal conductivity (below 2.5 W/m<sup>2</sup>·°C).*

*Thus, it is adopted the solution of partial substitution (20-40%) of the usual aggregate of super aluminous concrete with high refractoriness (tabbed alumina)*

agregat ușor (alumina globulară), contribuind la reducerea densității și creșterea porozității materialului. Alumina globulară reprezintă sfere de alumina topită obținute prin suflarea, peste un strat subțire de alumina topită, cu aer sau abur la presiune ridicată.

Au fost adoptate alte două variante de beton superaluminos cu dozaj de ciment de 9% și substituirea agregatului uzual, în proporție de 20% și, respectiv, 40% cu alumina globulară.

Probele realizate din cele două variante de betoane au fost caracterizate utilizând aceleași metode ca în cazul primelor teste experimentale. Rezultatele obținute au indicat, ca material cu caracteristici optime pentru scopul avut în vedere, betonul superaluminos cu 9% dozaj de ciment și 20% substituire a agregatului uzual cu alumina globulară, conductivitatea termică fiind redusă până la 1,6 W/m·°C (după ardere la 1500°C) [7, 8, 10, 11].

**Tabelul 1** prezintă caracteristicile fizice și chimice ale materialului monolitic refractar adoptat [8, 10, 11].

with a lightweight aggregate (globose alumina), contributing to density decreasing and porosity increasing of material. Globose alumina represents spheres of molten alumina obtained by blowing, over a thin flow of molten alumina, with air or steam at high pressure.

Other two variants of super aluminous concrete with cement dosage of 9% and usual aggregate substitution at a rate of 20% and 40%, with globose alumina, were adopted.

The samples made from the two concretes variants were characterized using the same methods as in the case of the first experimental tests. Results indicated, as material with optimal characteristics for the purpose in view, the super aluminous concrete with cement dosage of 9% and substitution of usual aggregate of 20% with globose alumina, the thermal conductivity being decreased up to 1.6 W/m·°C (after burning at 1500°C) [7, 8, 10, 11].

**Table 1** presents the physical and chemical characteristics of the adopted monolithic refractory material [8, 10, 11].

Tabelul 1. Caracteristicile fizice și chimice ale betonului refractar adoptat

Table 1. Physical and chemical characteristics of adopted refractory concrete

Characteristics	U.M.	Value
Main chemical components:		
- Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	94.2
- CaO	%	2.9
- Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0.4
Compression strength		
- at 110°C	MPa	15.0
- at 1000°C	MPa	21.0
- at 1500°C	MPa	37.7
Aparent density		
- at 110°C	g/cm <sup>3</sup>	2.30
- at 1000°C	g/cm <sup>3</sup>	2.25
- at 1500°C	g/cm <sup>3</sup>	2.40
Porosity		
- at 110°C	%	26.9
- at 1000°C	%	27.7
- at 1500°C	%	27.1
Thermal conductivity		
- at 1000°C	W/m·°C	1.53
- at 1500°C	W/m·°C	1.60
Using limited temperature	°C	1750
Required material	t/m <sup>3</sup>	2.43
Working water	%	4.95
Application method	-	vibration- stamping

## 2.2. Testarea pe model experimental a soluțiilor de înlocuire a structurii căptușelii refractare a oalelor

Modelul experimental pentru determinarea pierderilor de căldură prin căptușeala refractară a oalei de turnare

## 2.2. Testing on experimental model of substitution solutions of ladles refractory lining structure

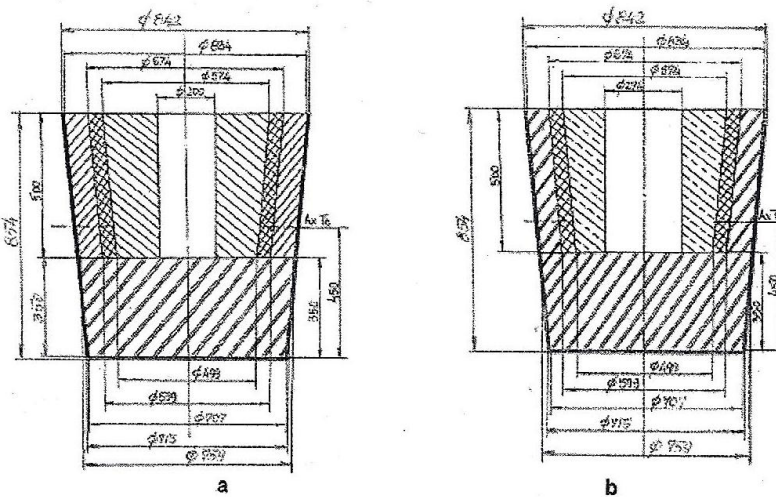
The experimental model for determination of heat losses through the refractory lining of steel ladle was

a oțelului a fost realizat ca o structură metalică sudată, de formă tronconică, din tablă de oțel cu grosimea de 4 mm. Dimensiunile modelului sunt: 842 mm (diametrul superior, 715 mm (diametrul inferior) și 850 mm (înălțimea).

Pe pereții modelului se realizează, succesiv, atât tipurile de căptușeală refractară de referință utilizate în mod curent la ArcelorMittal Galați (cărămizi magnezio - spinelice ca strat de uzură, cărămizi silico - aluminoase ca strat permanent, dolomită granulată liată cu gudron ca strat intermediar și, respectiv, blocuri dolomitice ca strat de uzură, beton refractar înalt aluminos ca strat permanent și dolomită granulată liată cu gudron ca strat intermediar), cât și variantele care substituie stratul intermediar cu beton refractar superaluminos, pentru ambele tipuri de căptușeală de referință, menționate mai sus.

Pentru fiecare tip de înzidire s-au realizat canale horizontale prin stratul permanent, făcând posibilă introducerea unor termocuple de pasaj și fixarea capetelor lor pe fețele anterioare ale stratului permanent și, respectiv, pe fețele exterioare ale stratului de uzură. Deci, toate cele patru termocuple vor indica simultan valorile temperaturilor din zonele de separare dintre stratul permanent și cel intermediar, respectiv, dintre stratul de uzură și cel intermediar [11].

**Figura 1** prezintă dimensiunile celor trei straturi refractare în primul și al doilea tip de căptușeală.



**Fig. 1.** Dimensiunile straturilor refractare  
a - în primul tip de căptușeală; b - în al doilea tip de căptușeală  
*The dimensions of refractory layers*  
a- in the first lining type; b - in the second lining type.

**Figura 2** prezintă o imagine a modelului experimental.

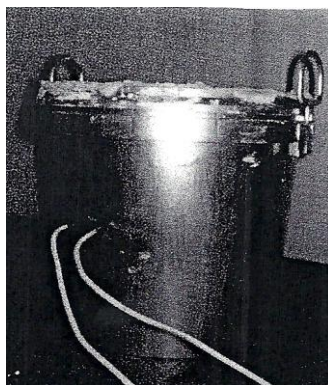
realized as a welded metallic structure, of truncated shape, from steel plate with a thickness of 4 mm. The dimensions of model are: 842 mm (the upper diameter), 715 mm (the lower diameter) and 850 mm (the height).

On the model walls are performed, subsequently, both the reference refractory lining types, used currently in ArcelorMittal (magnesia - spinel bricks as working layer, silica - aluminous bricks as permanent layer, granulated dolomite bounded with tar as intermediate layer and, respectively, dolomite blocks as working layer, high aluminous refractory concrete as permanent layer and granulated dolomite bounded with tar as intermediate layer) and the variants which substitute the intermediate layer with super aluminous refractory concrete for both reference lining types, mentioned above.

For each masonry mode, horizontal channels have been performed across the permanent layer, making possible the insertion of some pass - through thermocouples and fixing their ends on the anterior faces of the working layer. Thus, all four thermocouples will indicate simultaneous the values of temperatures in the separation areas between the permanent and intermediate layers, respectively, between the working and intermediate layers [11].

**Figure 1** presents the dimensions of the three refractory layers in the first and the second lining type.

**Figure 2** presents an image of the experimental model.



**Fig. 2.** Imagine a modelului experimental cu termocuplele instalate pe pereți  
*Image of the experimental model with thermocouples installed on the sidewalls*

În scopul evitării pierderilor de căldură pe la partea superioară a modelului s-a realizat un capac căptușit cu fibră ceramică, cu grosimea de 200 mm [11].

Fiecare tip de căptușeală refractară a fost uscat și preîncălzit conform recomandărilor din literatură [5].

Spațiul interior al modelului înzidit este umplut cu oțel topit, elaborat într-un cuptor electric cu inducție. Cantitatea de oțel turnat este constantă pentru fiecare set de dimensiuni și anume 88 kg. Nivelul coloanei de oțel lichid va fi la o distanță de 100 mm față de marginea superioară a modelului.

### 3. REZULTATE EXPERIMENTALE

#### 3.1. Determinarea experimentală a densității fluxului termic

Modelul experimental asigură condițiile industriale la care este supusă căptușeala refractară a oalelor, deși cantitatea de oțel turnată în spațiul interior este mult mai mică. Temperatura suprafețelor interioare ale stratului de uzură se identifică cu temperatura oțelului lichid. Cantitatea mică de oțel pierde căldură suficient de rapid și, de aceea, s-au stabilit perioade de timp distincte, în care se măsoară temperaturile în straturile de zidărie, temperatura oțelului și temperaturile pe suprafața metalică exterioară a modelului, măsurătorile de temperatură corespunzând unui regim termic independent. Intervalul temperaturilor oțelului topit din spațiul interior al modelului este 1630-1656°C, corespunzând temperaturilor oțelului din oalele industriale. În acest interval s-au efectuat măsurători pentru patru seturi de temperaturi, fiecare set corespunzând unei situații reale din oțelărie.

Măsurătorile de temperatură din zidărie și de pe suprafața mantalei s-au efectuat din poziții opuse, situate în același plan orizontal, la 180° pe circumferința modelului și apoi, valorile medii au fost notate.

S-au repetat măsurătorile de temperatură după pauze de 3 minute, astfel încât determinările s-au efectuat după 4, 7, 10 sau 13 minute de la momentul terminării turnării oțelului în model.

*In order to avoid the heat losses on the upper part of the model, a cover lined with 200 mm of ceramic fibers has been performed [11].*

*Each refractory lining type has been dried and preheated as recommended by literature [5].*

*The inner space of the embedded model is filled out with molten steel, made in an electric induction furnace. The cast steel amount is a constant for each set of determinations, namely 88 kg. The level of the liquid steel column would be at a distance of 100 mm from the upper edge of the model.*

### 3. EXPERIMENTAL RESULTS

#### 3.1. Experimental determination of the thermal flow density

*The experimental model assures the industrial conditions at which is subjected the ladles refractory lining, though, the steel amount casted into the inner space is much smaller. The temperature of inner surfaces of the working layer identifies oneself with the molten steel temperature. The small amount of steel losses heat rapidly enough and, therefore, have been established distinct time periods for temperatures measurements in the masonry layers, steel and on the external metallic surface, this measurements corresponding to an independent thermal regime. The range of the molten steel temperatures in the inner space of model is 1630-1656°C, corresponding to the range of steel temperatures from the industrial ladles. In this range four sets of temperature measurements are performed, each set corresponding to a real situation from steelmaking.*

*The measurements of temperature from masonry and on the mantle surface have been performed from opposed positions, located in the same horizontal plane, at 180° on the circumference of the model and, then, the mean values were noted.*

*The measurements of temperature were repeated after 3 minutes breaks, so the determinations were performed after 4, 7, 10 or 13 minutes after the finish time of steel casting into the model.*

Temperatura oțelului la turnare a fost de cel puțin 1665°C, astfel încât intervalul de temperaturi pentru măsurători să fie între 1630° și 1656°C, permițând, astfel, recuperarea oțelului în stare lichidă la sfârșitul operației [11].

În **Tabelul 2** este o prezentare centralizată a rezultatelor tuturor măsurătorilor efectuate.

*The temperature of steel casting was at least 1665°C, so that the temperatures range for measurements to be between 1630-1656°C, allowing the recovery of steel in liquid state at the end of the operation [11].*

*In **Table 2** there is a centralized presentation of results of all measurements made.*

Tabelul 2. Rezultate ale măsurătorilor de temperatură  
*Table 2. Results of the temperature measurements*

Masonry mode	Time passed since steel casting, minutes	Temperature of liquid steel, [°C]	Mean temperature on the separation surface between the working and intermediate layers [°C]	Mean temperature on the separation surface between the intermediate and permanent layers, [°C]	Mean temperature of metallic mantle, [°C]
A	4	1651	880	755	229
	7	1646	875	750	224
	10	1640	869	744	218
	13	1632	861	736	210
	<b>Mean:</b>	<b>1642</b>	<b>871</b>	<b>746</b>	<b>220</b>
B	4	1652	887	683	141
	7	1647	882	678	136
	10	1641	876	672	130
	13	1633	868	664	122
	<b>Mean:</b>	<b>1643</b>	<b>878</b>	<b>674</b>	<b>132</b>
C	4	1650	889	661	121
	7	1645	884	654	116
	10	1639	878	650	110
	13	1630	869	641	101
	<b>Mean:</b>	<b>1641</b>	<b>880</b>	<b>652</b>	<b>112</b>
D	4	1656	944	805	240
	7	1650	938	799	234
	10	1644	932	793	228
	13	1636	924	785	220
	<b>Mean:</b>	<b>1646</b>	<b>935</b>	<b>796</b>	<b>231</b>
E	4	1655	941	709	132
	7	1649	935	703	126
	10	1643	929	697	120
	13	1635	921	689	112
	<b>Mean:</b>	<b>1646</b>	<b>932</b>	<b>700</b>	<b>123</b>
F	4	1652	938	678	101
	7	1646	932	672	95
	10	1640	926	666	89
	13	1632	918	658	81
	<b>Mean:</b>	<b>1643</b>	<b>929</b>	<b>669</b>	<b>92</b>

Cele șase moduri de înzidire au fost realizate după cum urmează:

A - primul mod de înzidire utilizat în prezent la ArcelorMittal Galați, constând în cărămizi magnezio - spinelice ca strat de uzură, dolomită granulată liată cu

*The six masonry modes have been performed as follows:*

*A - the first masonry mode used currently at Arcelor Mittal Galati, consisting in magnesia - spinel bricks as working layer, granulated dolomite bounded with*

gudron ca strat intermediar și cărămizi silico - aluminoase ca strat permanent.

B, C - modificări față de varianta de referință A, în care stratul intermediar este realizat din beton superaluminos cu 9% dozaj de ciment - varianta B și, respectiv, același tip de beton și substituirea a 20% din agregatul obișnuit cu alumină globulară - varianta C.

D - al doilea mod de înzidire aplicat în prezent la ArcelorMittal Galați, utilizând blocuri dolomitice ca strat de uzură, dolomită granulată liată cu gudron ca strat intermediar și beton refractar BR 90 ca strat permanent.

E, F - modificări față de varianta de referință D, în care stratul intermediar este realizat din același tip de beton superaluminos ca în cazul variantelor B și C (respectând aceeași ordine privind natura materialului).

Între suprafața interioară fierbinte a căptușelii refractare (temperatura ei este identică cu cea a oțelului lichid) și mediul înconjurător al modelului experimental (având o temperatură constantă de 18°C) are loc un transfer de flux termic ( $q_t$ ) prin straturile de zidărie, produs prin conductivitate termică și, apoi, prin radiație și convecție către mediul înconjurător, care se calculează cu următoarea relație [12, 13]:

$$q_t = (T_{int} - T_{ma}) / [\sum(\rho_i/\lambda_i) + 1/\alpha], \quad W/m^2 \quad (1)$$

unde:

$T_{int}$  - temperatura interioară fierbinte a căptușelii refractare a modelului, K;

$T_{ma}$  - temperatura mediului ambiant, K;

$\rho_i$  - grosimea stratului „i” al căptușelii refractare, m;

$\lambda_i$  - coeficientul de transfer de căldură prin conductivitate termică prin stratul „i”, W/m·K;

$\alpha$  - coeficientul de transfer de căldură prin convecție și radiație de la peretele exterior al modelului către mediul ambiant, W/m<sup>2</sup>·K.

Utilizând relația de calcul (1), au fost determinate valorile densității fluxului termic care străbate căptușeala refractară a modelului pentru toate cele șase variante structurale (două variante de referință și patru variante îmbunătățite), rezultatele fiind centralizate în **Tabelul 3**.

Tabelul 3. Calculul densităților fluxului termic prin căptușeala refractară a modelului experimental

Table 3. Calculation of the thermal flow densities through the refractory lining of the experimental model

Masonry mode	Thermal flow density	Percent decrease as compared with the reference situation of thermal flow density
	[W/m <sup>2</sup> ]	
A	8689	-
B	7671	11.7
C	7112	18.1
D	10278	-
E	8725	15.1
F	8069	21.5

tar as intermediate layer and silica - aluminous bricks as permanent layer.

B, C - changes from the reference variant A, where the intermediate layer is made from a super aluminous concrete with cement dosage of 9% - variant B and, respectively, the same concrete type and substitution of 20% from the usual aggregate with globose alumina - variant C.

D - the second masonry mode applied presently at ArcelorMittal Galati, using dolomite blocks as working layer, granulated dolomite bounded with tar as intermediate layer and refractory concrete BR 90 as permanent layer.

E, F - changes from the reference variant D, where the intermediate layer is made of the same type of super aluminous concrete that variants B and C (following the same order on the nature of material).

Between the hot inner surface of the refractory lining (its temperature is identical to that of liquid steel) and the environment of the experimental model (having the constant temperature of 18°C) there is transfer of thermal flow ( $q_t$ ) through the masonry layers, produced by thermal conductivity and, then, by radiation and convection to the environment, which is calculated with the following equation [12, 13]:

where:

$T_{int}$  - the hot inner temperature of the refractory lining of model, K;

$T_{ma}$  - the environmental temperature, K;

$\rho_i$  - thickness of layer „i” of the refractory lining, m;

$\lambda_i$  - the coefficient of heat transfer by thermal conductivity through the layer “i”, W/m·K;

$\alpha$  - the coefficient of heat transfer by convection and radiation from the external wall of model to the environmental, W/m<sup>2</sup>·K.

Using the relationship (1), have been determinate the values of thermal flux density that traverses the refractory lining of model for all the six structural variants (two reference variants and four improved variants), the results being centralized in **Table 3**.

Rezultatele din **Tabelul 3** arată că valoarea densității fluxului termic prin căptușeala refractară a modelului experimental este puternic diminuată, comparabil cu situația de referință (variantele A și D), cu 11,7 – 15,1% în cazul utilizării ca strat intermediar a betonului refractar cu dozaj de ciment de 9% (variantele B și E) și, respectiv, cu 18,1-21,5% în cazul utilizării aceluiași tip de beton și substituirea a 20% din agregatul obișnuit cu alumină globulară (variantele C și F) [11].

### 3.2. Eficiența economică și efectul ecologic al aplicării soluției de îmbunătățire a structurii căptușelii refractare a oalelor din industria oțelului

#### 3.2.1. Eficiența economică

Așadar, prin substituirea dolomitei granulate liate cu gudron cu un beton superaluminos, se pot reduce semnificativ pierderile de căldură prin mantaua oalei cu oțel topit către mediul înconjurător (cu 18,1 - 21,5%, adică în medie cu 19,8%). Implicit, oțelul lichid din oale își va conserva căldura în mai bune condiții, realizându-se fie diminuarea temperaturii de evacuare din convertizor, fie creșterea rezervei de timp pentru transportul oalei la instalația de turnare continuă.

Pentru calculul eficienței economice a noului tip de beton superaluminos, utilizat în stratul intermediar al oalei, se va alege varianta economiei de energie electrică datorată diminuării temperaturii de evacuare a oțelului din convertizor.

Economia de energie ( $E_c$ ) se calculează cu relația [11]:

$$E_c = (q_{\text{tref}} - q_t) \cdot S_p, \text{ [W]} \quad (2)$$

în care:

$q_{\text{tref}}$  - valoarea densității fluxului termic corespunzătoare modului de înzidire de referință (A sau D),  $\text{W/m}^2$ ;

$q_t$  - valoarea densității fluxului termic corespunzătoare modului de înzidire experimental (C sau F),  $\text{W/m}^2$ ;

$S_p$  - suprafața exterioară a mantalei oalei corespunzătoare peretelui ei vertical,  $\text{m}^2$ .

Se calculează numai suprafața peretelui vertical, fiind exceptat fundul oalei, deoarece modificarea structurală a căptușelii refractare vizează numai acest perete. Pentru oalele de turnare a oțelului de 180 t,  $S_p = 45 \text{ m}^2$ . Căldura fizică a oțelului topit din oală ( $Q_0$ ) se calculează cu relația [14]:

$$Q_0 = M_0 \cdot [c_0 \cdot (t_{\text{top}} - t_{\text{ma}}) + \lambda_{\text{top}} + c_0' \cdot (t_{\text{int}} - t_{\text{top}})], \text{ [W]} \quad (3)$$

unde:

$M_0$  - masa oțelului lichid din oală, kg;

$c_0$  - căldura specifică medie a oțelului între

8

*Results from **Table 3** indicates that the value of thermal flow density through the refractory lining of experimental model is seriously reduced, as compared with the reference situation (variants A and D), with 11.7-15.1% in the case of using, as intermediate layer, of the refractory concrete with a cement dosage of 9% (variants B and E) and, respectively, with 18.1-21.5% in the case of using of the same concrete type and substitution of 20% from the usual aggregate with globose alumina (variants C and F) [11].*

### 3.2. The economical efficiency and ecological effect of the application of the solution of structure improvement of ladle refractory from steel industry

#### 3.2.1. The economical efficiency

*Therefore, by substitution of granulated dolomite bounded with tar with a super aluminous concrete, can be reduced significantly the heat losses through the shell of ladle with molten steel towards environment (with 18.1-21.5%, i.e. mean 19.8%). Implicitly, the liquid steel from ladles will conserve its heat in better conditions, being allowed either decreasing of the output steel temperature from converter, or increasing of time reserve for ladle transport to continuous casting station.*

*For economical efficiency calculus of the new type of super aluminous concrete, used in the ladle intermediate layer, it will be selected the variant of electricity economy due decreasing of output temperature of steel from converter.*

*The energy economy ( $E_c$ ) is calculated with the relation [11]:*

$$(2)$$

where:

$q_{\text{tref}}$  - the value of thermal flow density corresponding to the reference masonry mode (A or D),  $\text{W/m}^2$ ;

$q_t$  - the value of thermal flow density corresponding to the experimental masonry mode (C or F),  $\text{W/m}^2$ ;

$S_p$  - the external surface of the shell of ladle corresponding to its vertical wall,  $\text{m}^2$ .

*It is calculated only the surface of vertical wall, excepting ladle bottom, because the structural modification of refractory lining concerns only this wall. For the steel ladles of 180 t,  $S_p = 45 \text{ m}^2$ .*

*The physical heat of liquid steel from ladle ( $Q_0$ ) is calculated with the relation [14]:*

$$(3)$$

where:

$M_0$  - the liquid steel mass from ladle, kg;

$c_0$  - the mean specific heat of steel between the molten



temperatura de topire și temperatura mediului ambiant [15],  $W/kg \cdot ^\circ C$ ;

$t_{top}$  - temperatura de topire a oțelului [14],  $^\circ C$ ;

$t_{ma}$  - temperatura mediului ambiant,  $^\circ C$ ;

$\lambda_{top}$  - căldura latentă de topire a oțelului [15],  $W/kg$ ;

$c_0'$  - căldura specifică medie a oțelului între temperatura din interiorul oalei și temperatura de topire [15],  $W/kg \cdot ^\circ C$ ;

$t_{0int}$  - temperatura oțelului lichid din interiorul oalei,  $^\circ C$ .

Cantitatea de energie termică conținută în oțelul lichid din oală prin aplicarea noii soluții de material refractar ( $Q_0'$ ) se calculează cu relația:

$$Q_0' = Q_0 - E_c, [W] \quad (4)$$

Dacă în relația (3) este substituit  $Q_0$  cu  $Q_0'$ , se poate determina noua valoare a temperaturii oțelului din oală, astfel încât, la instalația de turnare continuă, temperatura oțelului să rămână nemodificată, ca în situația de referință [11].

În **Tabelul 4** sunt prezentate rezultatele calculelor economiei de energie ( $E_c$ ), a căldurii fizice a oțelului lichid în situația de referință ( $Q_0$ ), respectiv, în variantele îmbunătățite ( $Q_0'$ ) și a temperaturii de turnare a oțelului în cele două moduri de înzidire a oalei [11].

Tabelul 4. Calculul noii temperaturi de turnare a oțelului din convertizor

Table 4. Calculus of the new steel casting temperature from converter

Masonry mode	Energy economy ( $E_c$ ) [W]	Physical heat of liquid steel, [W]		Steel casting temperature, [ $^\circ C$ ]	
		In reference situation ( $Q_0$ )	After new solution application ( $Q_0'$ )	In reference situation	After new solution application
Magnesia - spinel bricks as working layer	70965	68335580	68264615	1654	1650
Dolomite blocks as working layer	99405	68640220	68540815	1662	1657

Deci, se poate reduce temperatura oțelului din oală cu  $1654 - 1650 = 4^\circ C$  (pentru primul mod de înzidire) și cu  $1662 - 1657 = 5^\circ C$  (pentru cel de-al doilea mod de înzidire), în condițiile în care temperatura oțelului la instalația de turnare continuă rămâne nemodificată comparativ cu situația de referință.

Valoarea economiei de energie electrică ( $E_{ee}$ ) prin utilizarea noii structuri a căptușelii refractare [11] este:

$$E_{ee} = E_c \cdot T \cdot P_{ec} \cdot 10^{-6} / \eta, \text{ Euro/ciclu} \quad (4)$$

unde:

$T$  - numărul de turnări pe ciclul de utilizare a oalelor

temperature and the environment temperature [15],  $W/kg \cdot ^\circ C$ ;

$t_{top}$  - the molten temperature of steel [14],  $^\circ C$ ;

$t_{ma}$  - the environment temperature [15],  $^\circ C$ ;

$\lambda_{top}$  - the latent molten temperature [15],  $W/kg$ ;

$c_0$  - the mean specific heat of steel between the inner ladle temperature and the molten temperature [15],  $W/kg \cdot ^\circ C$ ;

$t_{0int}$  - the liquid steel temperature in ladle,  $^\circ C$ .

The thermal energy amount contained in the ladle liquid steel by application of the new solution of refractory material ( $Q_0'$ ) is calculated with the relation:

If in the equation (3)  $Q_0$  is substituted with  $Q_0'$ , it can determine the new value of steel temperature from ladle, so that, at the continuous casting station, the steel temperature remains non - modified, as in the reference situation [11].

In **Table 4** is presented the calculus results of energy economy ( $E_c$ ), of physical heat of liquid steel in the reference situation ( $Q_0$ ), respectively, in the improved variants ( $Q_0'$ ) and of casting temperature of steel in the two ladle masonry modes [11].

Thus, it can reduce the steel temperature in ladle with  $1654 - 1650 = 4^\circ C$  (for the first masonry mode) and with  $1662 - 1657 = 5^\circ C$  (for the second masonry mode), in conditions in which the steel temperature at the continuous casting station remains non - modified comparatively with the reference situation.

The value of electricity economy ( $E_{ee}$ ), by using of the new refractory lining structure [11], is:

where:

$T$  - casting number on ladles using cycle

( $T = 45$  turnări/ciclu, pentru oalele cu cărămizi magnezio - spinelice ca strat de uzură și  $T = 40$  turnări/ciclu, pentru oalele cu blocuri dolomitice ca strat de uzură);

$P_{ee}$  - prețul mediu al energiei electrice

( $P_{ee} = 90$  Euro/MWh);

$\eta$  - randamentul transformării energiei termice în energie electrică ( $\eta = 0,35$ ).

Din calcule rezultă că valoarea economiei de energie electrică este de 821,2 Euro/ciclu, pentru primul mod de înzidire și 1022,5 Euro/ciclu, pentru al doilea mod de înzidire, adică, în medie, 921,9 Euro/ciclu.

Oala de turnare a oțelului de la ArcelorMittal Galați utilizează circa 5 t dolomită granulată într-un volum disponibil între straturile de uzură și permanent de 1,96 m<sup>3</sup>. Prețul dolomitei granulate este de 30 Euro/t (adică, corespunzând unui ciclu de funcționare a oalei, 150 Euro/ciclu).

Prețul noului material monolitic refractar este de cca. 170 Euro/t (adică, 809,9 Euro/ciclu).

Deci, costul suplimentar al aplicării noului material este:

$809,9 - 150 = 659,9$  Euro/ciclu.

Valoarea medie a economiei rezultate prin aplicarea soluției tehnice de material monolitic refractar la cele două moduri de înzidire a oalelor de la ArcelorMittal Galați [11] este:

$921,9 - 659,9 = 262$  Euro/ciclu.

### 3.2.2. Efectul ecologic

Modificarea structurii căptușelii refractare a oalelor și îmbunătățirea protecției termice a oțelului lichid în aceste utilaje metalurgice contribuie la diminuarea emisiilor de gaze cu efect de seră (în special, CO<sub>2</sub>), datorită reducerii necesarului de oxigen industrial în convertizor și, implicit, reducerii consumului de energie electrică (pentru fabricarea oxigenului), pentru supraîncălzirea oțelului în convertizor. Se au în vedere emisii indirecte de CO<sub>2</sub>, rezultate în procesul de producere a energiei electrice prin arderea cărbunelui (lignit) în cazanele termocentralelor, factorul de emisie al lignitului fiind evaluat la 101,1 t CO<sub>2</sub>/GJ, conform documentelor Uniunii Europene [16].

Economia de energie electrică raportată la tona de oțel din oală se calculează cu următoarea relație [11]:

$$E_{eesp} = 10^{-3} \cdot (E_{cI} + E_{cII}) / 2\eta \cdot 3,6 M_0, \text{ kWh/t oțel} \quad (5)$$

unde:

$E_{cI}, E_{cII}$  - economiile de energie rezultate prin aplicarea modului de înzidire I și, respectiv, II,  $W$  (vezi **Tabelul 4**);

$M_0$  - masa oțelului din oală corespunzătoare unei turnări, t oțel/turnare ( $M_0 = 170$  t oțel/turnare).

( $T = 45$  castings/cycle, for the ladles with magnesia - spinel bricks as working layer and  $T = 40$  castings/cycle, for the ladles with dolomite blocks as working layer);

$P_{ee}$  - the mean price of electricity

( $P_{ee} = 90$  Euro/MWh);

$\eta$  - the conversion yield of heat in electricity ( $\eta = 0.35$ ).

From calculus results that the electricity economy value is of 821.2 Euro/cycle, for the first masonry mode and 1022.5 Euro/cycle, for the second masonry mode, i.e. mean 921.9 Euro/cycle.

The ArcelorMittal Galati steel ladle uses about 5 t of granulated dolomite into an available volume among working and permanent layers of 1.96 m<sup>3</sup>.

The price of granulated dolomite is of 30 Euro/t (i.e. corresponding to a working cycle of ladle, 150 Euro/cycle).

The price of the new monolithic refractory material is about 170 Euro/t (i.e. 809.9 Euro/cycle).

So, the supplementary cost of application of the new material is:

$809.9 - 150 = 659.9$  Euro/cycle.

The mean value of economy resulted by application of the technical solution of monolithic refractory material on the two masonry modes of ArcelorMittal Galati ladles [11] is:

$921.9 - 659.9 = 262$  Euro/cycle.

### 3.2.2. The ecological effect

The modification of ladles refractory lining structure and the improvement of thermal protection of liquid steel in this metallurgical equipments contribute to the diminution of the greenhouse gases emissions (CO<sub>2</sub> especially), due the reduction of industrial oxygen requirement in converter and, implicitly, the reduction of electricity consumption (for oxygen manufacturing), for the overheating of steel in converter. They are taken into consideration indirect emissions of CO<sub>2</sub> resulted in the manufacture process of electricity by the coal (lignite) combustion in the boilers of thermo - electric power stations, the emission factor of lignite being evaluated to 101.1 t CO<sub>2</sub>/GJ, according to the European Union documents [16].

The economy of electricity reported to ladle steel tone is calculated with the following relation [11]:

where:

$E_{cb}, E_{cII}$  - energy economies resulted by application of the first and, respectively, the second masonry mode,  $W$  (see **Table 4**);

$M_0$  - the ladle steel mass corresponding to a casting, t steel/casting ( $M_0 = 170$  t steel/casting).

Așadar:

So:

$$E_{\text{eesp}} = 10^{-3}(70965 + 99405) / 2 \cdot 0,35 \cdot 170 = 1,43 \text{ kWh/t steel (sau } 5,15 \text{ kJ/t steel)}$$

Cantitatea anuală a reducerii emisiilor indirecte de CO<sub>2</sub> în atmosferă, considerând factorul de emisie al lignitului  $F = 101,1 \text{ t CO}_2/\text{GJ}$  și producția anuală de oțel a Arcelor Mittal Galați,  $P_{\text{an}} = 2,5 \cdot 10^6 \text{ t/an}$ , se calculează cu relația [11]:

*The annual amount of reduction of indirect emissions of CO<sub>2</sub> in atmosphere, considering the emission factor of lignite  $F = 101.1 \text{ t CO}_2/\text{GJ}$  and the annual production of steel of Arcelor Mittal Galati,  $P_{\text{an}} = 2.5 \cdot 10^6 \text{ t/year}$ , is calculated with the relation [11]:*

$$E_{\text{co2}} = E_{\text{eesp}} \cdot F \cdot P_{\text{an}} \cdot 10^{-6}, \quad \text{t CO}_2/\text{an} \quad (6)$$

Deci:

So:

$$E_{\text{co2}} = 5,15 \cdot 101,1 \cdot 2,5 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6} = 1,3 \cdot 10^3 \text{ t CO}_2/\text{year}$$

Această valoare a reducerii emisiilor de CO<sub>2</sub> reprezintă o importantă cantitate la nivelul siderurgiei din România, evaluată la  $16 \cdot 10^6 \text{ t CO}_2/\text{an}$  [17]. Deci, aplicarea soluției de îmbunătățire a structurii căptușelii refractare a oalelor de turnare a oțelului este foarte necesară.

*This value of CO<sub>2</sub> emissions reduction represent a significant amount at the Romanian iron and steel industry level, evaluated at  $16 \cdot 10^6 \text{ t CO}_2/\text{year}$  [17]. Therefore, the application of improvement solution of refractory lining of steel ladles is very necessary.*

#### 4. CONCLUZII

#### 4. CONCLUSIONS

1. Identificarea cauzelor care influențează pierderile mari de căldură prin căptușeala refractară a oalelor de turnare a oțelului, respectiv, stratul intermediar executat din dolomită granulată liată cu gudron, a condus la căutarea de soluții pentru eliminarea acestui dezavantaj. Astfel, au fost propuse două variante de materiale monolitice refractare.
2. S-a testat capacitatea de conservare a energiei termice a variantelor de straturi refractare pe un model experimental, realizat pentru acest scop.
3. Rezultatele experimentale au evidențiat eficiența soluției care prevede utilizarea, ca strat intermediar, a unui beton refractar superaluminos cu peste 94% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, la care se înlocuiește 20% din agregatul obișnuit din alumină tabulară, cu alumină globulară.
4. Densitatea fluxului termic care străbate căptușeala refractară se reduce cu 18,1-21,5% comparativ cu situația de referință, dacă se utilizează un beton superaluminos conținând alumină globulară, determinând o substanțială diminuare a pierderilor de căldură prin căptușeala refractară a oalelor.
5. Consecință a aplicării noului material refractar în componența căptușelii oalelor, oțelul lichid își conservă mai bine energia termică, conducând la scăderea temperaturii de supraîncălzire a oțelului în convertizor cu 4 - 5°C.
6. Valoarea economiei de energie datorată utilizării noului material monolitic în căptușeala refractară a oalelor, de 921,9 Euro/ciclu, este evident mai mare decât costul suplimentar al înlocuirii dolomitei granulate liate cu gudron, cu acest material (659,9 Euro/ciclu).

1. *The identification of causes which influence the high heat losses through the refractory lining of steel ladles, respectively, the intermediate layer made of granulated dolomite bounded with tar, led to search for solutions in order to eliminate this disadvantage. Thus, have been proposed two variants of monolithic refractory materials.*
2. *It was tested the thermal energy conservation capacity of refractory layers variants on an experimental model, made for this purpose.*
3. *The experimental results emphasized the efficiency of solution that provides the use, as intermediate layer, of a super aluminous refractory concrete with over 94% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, at which is substituted 20% from the usual aggregate of tabbed alumina, with globose alumina.*
4. *The density of thermal flow, that traverses the refractory lining, is reduced with 18.1-21.5% compared to the reference situation, if it is used a super aluminous concrete containing globose alumina, causing a substantial reduction of the heat losses through the ladle refractory lining.*
5. *Consequence of applying the new refractory material in the ladles lining composition, the liquid steel preserves better its thermal energy, leading to the decrease of overheating temperature of steel in converter with 4 - 5°C.*
6. *The value of energy economy of 921.9 Euro/cycle, due to use of the new monolithic material in ladles refractory lining, is obviously greater than the supplementary cost of replacement of granulated dolomite bounded with tar, with this material (659.9 Euro/cycle).*

7. Datorită economiei de energie electrică pentru supraîncălzirea oțelului în convertizor, protecția mediului este îmbunătățită prin reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră cu  $1,3 \cdot 10^3$  t CO<sub>2</sub>/an, cantitate importantă la nivelul emisiilor totale din siderurgia românească, evaluată la  $16 \cdot 10^6$  t CO<sub>2</sub>/an.
7. *Due to the economy of electricity to the steel overheating in converter, the environmental protection is improved by reducing of greenhouse gases with  $1.3 \cdot 10^3$  t CO<sub>2</sub>/year, a significant amount compared to the total emissions from the Romanian iron and steel industry, evaluated at  $16 \cdot 10^6$  t CO<sub>2</sub>/year.*

### BIBLIOGRAFIE / REFERENCES

- [1] **N. ANGELESCU, L. PĂUNESCU** - *Researches in view of heat losses reduction through the thermal insulation of the casting ladles*, Metalurgia International, vol.XIV, no. 8, 2009.
- [2] **N. ANGELESCU ș.a.** - *Noi betoane refractare speciale*, Jurnalul Român al Materialelor, 40 (2), pag. 3-14, 2010.
- [3] **N. ANGELESCU, F. OPREA** - *Monolitice speciale pentru oalele de turnare din oțelărie*, Editura Macarie, Târgoviște, 2002.
- [4] **N. ANGELESCU** - *Heating behavior of monolithic bound by coagulation*, Cement and Concrete World, vol. 8, no. 44, 2003.
- [5] **N. ANGELESCU** - *Complex binding matrix*, Special Magazine on Engineering Materials, Ljubljana, Slovenia, January 11 - 13, 1996.
- [6] **N. ANGELESCU et all.** - *Different binding systems coexistence*, The 5-th NCB International Seminar, vol. III - XIII, New Delhi, India, 1996.
- [7] **L. PĂUNESCU** - *Contribution to increasing of ladles refractory linings from steel industry*, Cercetări Doctorale, vol. I, 2009.
- [8] **L. PĂUNESCU, Gh. SURUGIU** - *Super aluminous refractory concrete with low cement dosage for intermediate layer of steel ladles refractory lining*, Metallurgy and New Materials Researches, vol. VIII, no. 2, 2010.
- [9] **V. MOLDOVAN** - *Aditivi în betoane*, Editura Tehnică, București, 1978.
- [10] **N. ANGELESCU, L. PĂUNESCU, Gh. SURUGIU** - *Thermal conductivity reduction basic requirement of performance refractory linings*, Metalurgia International, vol. XV, no. 10, 2010.
- [11] **L. PĂUNESCU** - *Eficientizarea fluxurilor tehnologice funcție de natura căptușelilor refractare ale oalelor de turnare din industria oțelului*, Teză de doctorat, Universitatea Valahia Târgoviște, 29 septembrie 2011.
- [12] **M. POP ș.a.** - *Ghid - Tabele, monograme și formule termotehnice*, Editura Tehnică, București, 1987.
- [13] **E. M. GOLDFARB ș.a.** - *Calculul încălzirii cuptoarelor*, Editura Tehnică, București, 1960.
- [14] **A. RĂU, I. TRIPȘA** - *Metalurgia oțelului*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1973.
- [15] **K. RAZNJEVIC** - *Tabele și diagrame termodinamice*, Editura Tehnică, București, 1978.
- [16] \* \* \* - *Establishing method of leading lines for greenhouse gases monitoring and reference according Directive 2003/87/CE*, Decision of European Committee 2004/156/CE (RG1), Brussels, 2006.
- [17] \* \* \* - *Plan de alocare național pentru 2008 - 2012*, Ministerul Mediului și Apelor, București, 2006.