

ACUMULATOR DE ENERGIE TERMICĂ ÎN INDUSTRIA OȚELULUI

THERMAL ENERGY ACCUMULATOR IN STEEL INDUSTRY

C. POPESCU¹, L. PĂUNESCU², M. HRIȚAC²

¹Institutul de Cercetări Metalurgice București

²CERMAX 2000 PATENTS SRL București

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

REZUMAT / ABSTRACT

Lucrarea prezintă rezultatele cercetării efectuate de un colectiv de la societatea Cermax 2000 Patents SRL și ICEM SA în vederea recuperării căldurii fizice a zgurii de oțelărie, în condițiile în care această resursă energetică este repartizată neuniform și în cantități relativ mici.

Ținând seama de particularitățile zgurii de oțelărie, soluția adoptată constă în utilizarea unui acumulator de caldură cu bile ceramice din șamotă, alimentat de aerul cald rezultat din contactul la viteză mare cu jetul de zgură topită. Încălzirea acumulatorului se produce în timpul celor 10 minute cât durează turnarea zgurii, temperatura medie a bilelor ajungând la 285°C. Răcirea liberă a acumulatorului are loc în 30 ore cu viteza medie de 8,4°C/h. Soluția este aplicabilă în procese de uscare a materiilor prime și materialelor cu conținut ridicat de umiditate.

This paper presents the research results conducted by a team from the company Cermax 2000 Patents SRL and ICEM SA to recover the physical heat of steelworks slag, given that this energy resource is distributed unevenly and in relatively small quantities.

Considering the peculiarities of steelworks slag, the adopted solution is to use a heat accumulator with ceramic balls from chamotte, powered by the warm air resulting from the contact at high speed with the molten slag jet. The heating of accumulator occurs during the 10 minutes how long it last the slag casting, when the average temperature of balls reaching 285°C. The free cooling of accumulator occurs in 30 hours, with an average speed of 8.4°C/h. The solution is applicable in processes of drying of raw materials with high moisture content.

Keywords: slag, granulation, accumulator, air, ball

1. INTRODUCERE

Industria siderurgică constituie un domeniu economic caracterizat prin consumuri energetice ridicate. Implicit, produsele rezultate, indiferent dacă sunt produse finale sau deșeuri solide, lichide sau gazoase au un conținut ridicat de energie.

Începând din anii '70 ai secolului trecut, odată cu apariția crizei mondiale a petrolului, a devenit o prioritate investigarea posibilităților de recuperare energetică a tuturor resurselor energetice disponibile, în special în țările puternic industrializate, dar lipsite, total sau parțial, de resurse naturale. Un exemplu în acest sens l-a constituit Japonia, care a cercetat, realizat și aplicat, încă din primii ani de criză, soluții de recuperare energetică, în special în metalurgie [1].

1. INTRODUCTION

The iron and steel industry constitutes an economic area characterized by high energy consumptions. Implicitly, the products, regardless of whether they are end - products, or solid, liquid or gaseous waste contain high levels energy.

Since the '70s of last century, with the advent of world oil crisis, has become a priority to investigate the possibilities of energy recovery of all available resources, particularly in industrialized countries, but lacking all or part of natural resources. An example of this it was Japan, who researched, developed and applied, since the early years of crisis, energy recovery solutions, especially in metallurgy [1].

Un caz aparte între resursele energetice secundare cu potențial energetic ridicat din siderurgie îl constituie căldura fizică a zgurii de oțelărie. Particularitatea acestei resurse este repartiția neuniformă a producției de zgură și cantitățile relativ mici evacuate din cuptorul de topire, în ciuda conținutului ridicat de energie (1,8 - 1,9 GJ/t oțel) [2, 3]. Din această cauză, soluțiile cu largă aplicabilitate pe plan mondial vizează valorificarea zgurii de oțelărie ca material refolosibil în construcții civile, construcțiile de drumuri, fertilizări, industria cimentului etc. Astfel, în Japonia, din cele 8,9 mil.t. zgură de convertizor se valorifică 88%, iar din cele 2,4 mil.t. zgură de oțel electric se recuperează 75% [4].

2. STADIUL ACTUAL PE PLAN MONDIAL AL RECUPERĂRII CĂLDURII FIZICE A ZGURII DE OȚELĂRIE

Deși, distribuția cantităților de zgură de oțelărie este nefavorabilă pentru o recuperare eficientă a căldurii sale fizice, în ultimii ani există informații privind testarea unor soluții de recuperare. Acestea se bazează pe metode fizice, cunoscute încă de acum 40 ani, aplicabile zgurii de furnal (impactul zgurii cu un jet puternic de aer sau granulara centrifugală cu tambur rotativ) [3, 5, 6]. De asemenea, sunt informații privind metode chimice de utilizare a căldurii zgurii de oțelărie pentru realizarea reacției de reformare a metanului sau pentru desfășurarea procesului de gazificare a cărbunelui [3, 5, 6].

Dar, niciuna din soluțiile prezentate mai sus nu a depășit stadiul de studiu de cercetare în laborator sau brevete de invenție, datorită lipsei uniformității distribuției resursei energetice constituite de zgura de oțelărie.

3. DESCRIEREA SOLUȚIEI DE RECUPERARE

Ținând seama de particularitățile zgurii de oțelărie, soluția adoptată de colectivul de cercetare de la Cermax 2000 Patents SRL constă în construcția unui acumulator de căldură, care recepționează căldura aerului utilizat la granulara zgurii. Acumulatorul este o incintă cu pereții laterali și bolta căptușiți cu material monolitic termoizolator, la care se adaugă un strat de fibră ceramică, care conține bile din șamotă cu diametrul de 20 mm. Acestea sunt așezate pe un grătar metalic cu fante de 15 mm, dispus la baza acumulatorului. Între nivelul superior al coloanei bilelor ceramice și boltă este lăsat un spațiu de circa 20 mm pentru colectarea aerului care străbate canalele dintre bile. Evacuarea aerului se face printr-o conductă dispusă în boltă, din care pornesc două ramificații, fiecare prevăzută cu câte o clapetă de închidere. Una din ramificații preia aerul cald obținut în timpul

A special case among the secondary energy resources with high energy potential of the iron and steel industry constitutes the physical heat of steelworks slag. The peculiarity of this resource is the unevenly distribution of slag production and relatively small quantities discharged from the melting furnace, despite its high energy content (1.8 - 1.9 GJ/t steel) [2, 3]. Because of this, the solutions with wide applicability in the world refer to revaluation of steelworks slag as recyclable material in civil constructions, road constructions, fertilizations, cement industry etc. So, in Japan, from the 8.9 millions t. converter slag valorize 88% and from the 2.4 millions t. slag of electric steel recover 75% [4].

2. CURRENT STATE IN THE WORLDWIDE OF THE PHYSICAL HEAT RECOVERY OF STEELWORKS SLAG

Although, the distribution of steelworks slag amounts is unfavorable to efficiently recover his physical heat, in the last years there are information on testing of some recovery solutions. These are based on physical methods, known since 40 years ago, applicable to blast furnace slag (impact of slag with a strong jet of air or centrifugal granulation with a rotary drum) [3, 5, 6]. Also, there are information on chemical methods of using the heat of steelworks slag to achieve the methane reforming reaction or the coal gasification process [3, 5, 6].

But, none of the above solutions did not exceed the stage of laboratory research studies or patents, due to the lack of uniformity of energy resource distribution constituted of steelworks slag.

2. DESCRIPTION OF THE RECOVERY SOLUTION

Taking into account the peculiarities of steelworks slag, the solution adopted by the research team from Cermax 2000 Patents SRL consists in the construction of a heat accumulator, which receives the heat of air used to slag granulation. The accumulator is an enclosure with side walls and vault lined with insulating monolithic material to which is added a layer of ceramic fiber, containing chamotte balls of 20 mm diameter. These are placed on a metallic grill with slots of 15 mm, fitted at the bottom of accumulator. Between the upper level of ceramic balls column and vault is left a space of about 20 mm for collecting the air that passes through canals of balls. The exit of air is made through a pipe disposed in vault, from which leave two branches, each provided with a gate valve. One of branches takes warm air obtained during the granulation process and

procesului de granulare și îl reintroduce în incinta cu bile a acumulatorului, pe la baza unuia din pereții laterali. Cea de-a doua ramificație preia aerul cald produs în perioada în care acumulatorul conservă căldura disponibilă și îl trimite la un consumator de căldură (de exemplu, un uscător de materiale). Cel de-al treilea traseu posibil este o conductă verticală, prevăzută cu clapetă de închidere, care permite eșaparea aerului cald în atmosferă în caz de necesitate. Procesul de granulare a zgurii se realizează prin insuflarea unui jet puternic de aer, cu viteza de 100 m/s, care "spală" un plan înclinat, pe care cade jetul de zgură lichidă. Zgura este astfel granulată la dimensiuni de 2 - 6 mm și, în același timp, este răcită până la circa 250°C. Granulele se acumulează la baza instalației, sub grătarul metalic. Adeziunea dintre granule este superficială, astfel încât evacuarea zgurii la finalul procesului se face cu ușurință. În perioada următoare finalizării turnării zgurii, spațiul vertical prin care jetul de zgură cade pe planul înclinat este închis cu o placă metalică. Astfel, în perioada utilizării căldurii acumulate aerul de la ventilator este dirijat prin canalele acumulatorului. Principiul constructiv și funcțional al instalației de recuperare a căldurii fizice a zgurii de oțelărie este prezentat în **Figura 1**.

reintroduces it inside the accumulator, on the basis of one of the side walls. The second branch takes warm air produced during conservation in accumulator of available heat and sends it to a heat consumer (for example, a material dryer). The third possible route is a vertical pipe, provided with a gate valve, which allows to exit warm air in atmosphere, if necessary.

The process of slag granulation is achieved by blowing a strong jet of air, at a speed of 100 m/s, that "washes" an inclined plane, which falls molten slag jet. Thus, the slag is granulated at sizes of 2 - 6 mm and, at the same time, is cooled up to 250°C. The granules are accumulated at the base of the installation, under the metallic grill. The adhesion between the granules is superficial, so that the slag discharge at the end of the process is easily. In the next period of finalizing of the casting slag, the vertical space through the slag jet falls on the inclined plane is closed with a metallic plate. Thus, during use the accumulated heat, the air from the fan is routed through the canals of accumulator.

*The constructive and functional principle of the installation of steelworks slag heat recovery is presented in **Figure 1**.*

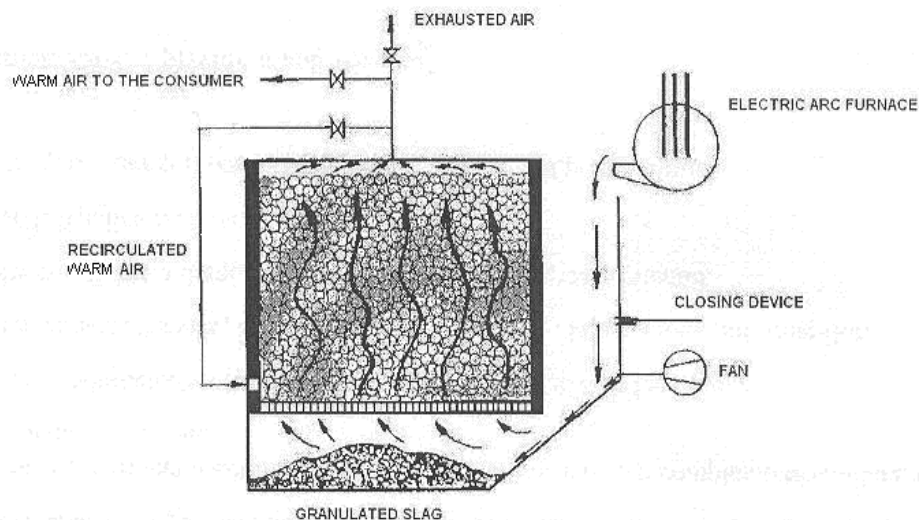


Fig. 1. Principiul constructiv și funcțional al instalației de recuperare a căldurii fizice a zgurii de oțelărie
The constructive and functional principle of the installation of physical heat recovery of steelworks slag

4. CALCULUL TRANSFERULUI DE CĂLDURĂ

Instalația experimentală pentru recuperarea căldurii fizice a zgurii de oțelărie a fost proiectată ținând seama de capacitatea cuptorului electric cu arc existent în baza experimentală a societății Cermax 2000 Patents, de 325 kVA.

Zgura rezultată în procesul de elaborare a oțelurilor slab aliate este de circa 140 kg/t oțel, la temperatura de 1590°C. Prin răcirea sub influența curentului puternic

4. THE CALCULATION OF THE HEAT TRANSFER

The experimental installation of steelworks slag physical heat recovery, was designed taking into account the capacity of the electric arc furnace existing on the experimental basis of the company Cermax 2000 Patents, of 325 kVA.

The slag resulted during the process of elaboration of low alloyed steel is about 140 kg/t steel, at the temperature of 1590°C. By cooling due the strong

de aer, zgura cedează căldura până la temperatura de circa 250°C. Utilizând relația de mai jos [7] se calculează cantitatea de căldură cedată de zgură în timpul procesului de granulare:

$$Q_{zg} = M_{zg} (c_{zge} \cdot t_{zge} + \lambda_{zg} - c_{zgf} \cdot t_{zgf}), \quad \text{kJ/t steel} \quad (1)$$

unde:

M_{zg} - masa zgurii, kg/t oțel;

c_{zge} - căldura specifică a zgurii la evacuarea din cuptor, kJ/kg · grd;

t_{zge} - temperatura de evacuare a zgurii din cuptor, °C;

λ_{zg} - căldura latentă de topire a zgurii, kJ/kg;

c_{zgf} - căldura specifică a zgurii la finalul procesului de granulare, kJ/kg · grd;

t_{zgf} - temperatura zgurii la finalul procesului de granulare, °C.

Deci:

$$Q_{zg} = 140 (1,247 \cdot 1590 + 209 - 0,98 \cdot 250) = 272542 \text{ kJ/t steel}$$

Debitul de aer necesar pentru granulara zgurii este cuprins în intervalul 2,5 - 2,9 Nm³/t zgură [3]. Se adoptă valoarea medie de 2,7 Nm³/t zgură, rezultând un debit de aer de: 2,7 · 140 = 378 Nm³/t oțel.

Aerul este furnizat la presiunea de 210 mbar.

Adoptând un randament termic al procesului de granulare $\eta = 0,9$ se poate calcula entalpia aerului cald rezultat în urma transferului de căldură zgură - aer. Relația de calcul rezultă din ecuația bilanțului termic al procesului de granulare [8, 9, 10]:

$$h \cdot Q_{zg} = D_{aer} (i_{af} - c_{ao} \cdot t_{ao}) \quad (2)$$

unde:

η - randamentul termic al procesului;

D_{aer} - debitul de aer insuflat, Nm³/t oțel;

i_{af} - entalpia aerului la temperatura corespunzătoare finalului procesului de granulare, kJ/Nm³;

c_{ao} - căldura specifică a aerului înaintea contactului cu zgura, kJ/Nm³ · grd;

t_{ao} - temperatura aerului înaintea contactului cu zgura, °C.

Din ecuația (2) se poate calcula entalpia aerului i_{af} :

$$i_{af} = (\eta Q_{zg} + D_{aer} \cdot c_{ao} \cdot t_{ao}) / D_{aer}, \quad \text{kJ/Nm}^3 \quad (3)$$

Așadar:

$$i_{af} = (0,9 \cdot 272542 + 378 \cdot 1,301 \cdot 20) / 378 = 674,9 \text{ kJ/Nm}^3$$

Această valoare a entalpiei aerului corespunde temperaturii de 505°C, care este temperatura cu care aerul intră în acumulatorul de căldură.

current of air, the slag transfers its heat up to the temperature of about 250°C. Using the below relationship [7] is calculated the amount of slag heat yielded during the granulation process:

where:

M_{zg} - the slag mass, kg / t steel;

c_{zge} - the specific heat of slag at the discharge from the furnace, kJ/kg · grd;

t_{zge} - the discharge temperature of slag from the furnace, °C;

c_{zgf} - the specific heat of slag at the end of the granulation process, kJ/kg · grd;

t_{zgf} - the slag temperature at the end of the granulation process, °C

So:

The air flow required for the slag granulation is contained in the range 2.5 - 2.9 Nm³/t slag [3]. It is adopted the average value of 2.7 Nm³/t slag, resulting an air flow of: 2.7 · 140 = 378 Nm³/t steel.

The air is supplied at the pressure of 210 mbar.

Adopting a thermal efficiency of the slag granulation process $\eta = 0.9$ it can be calculated the enthalpy of warm air resulted during the heat transfer slag - air. The relationship results from the thermal balance equation of the granulation process [8, 9, 10]:

where:

η - the thermal efficiency of the process;

D_{aer} - the flow of the instilled air, Nm³/t steel;

i_{af} - the air enthalpy at the temperature corresponding to the end of granulation process, kJ/Nm³;

c_{ao} - the specific heat of air prior to the contact with slag, kJ/Nm³ · grd;

t_{ao} - the air temperature prior to the contact with slag, °C.

From the equation (2) it can be calculated the air enthalpy i_{af} :

So:

This value of the air enthalpy corresponds to the temperature of 505°C, which is the air temperature at the entrance into the heat accumulator.

Cantitatea de oțel produsă în cuptorul electric cu arc de la Cermax 2000 Patents este 285 kg/șarjă, iar cantitatea de zgură corespunzătoare este 39,9 kg/șarjă. Durata șarjei este 2,5 ore, iar durata procesului de evacuare a materialului în stare topită din cuptor este 10 minute.

Granularea zgurii cu aer are loc în acest interval de timp. Cantitatea de aer necesară, de $2,7 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ zgură, adică $107,7 \text{ Nm}^3/\text{șarjă}$, este furnizată integral în cele 10 minute. Deci, ventilatorul distribuie un volum orar de aer de: $107,7 \cdot 60/10 = 646,2 \text{ Nm}^3/\text{h}$, timp de 10 minute.

Conform calculelor, aerul pătrunde în acumulatorul de căldură la temperatura de 505°C . Dimensiunile de gabarit ale incintei acumulatorului experimental sunt: $500 \times 500 \times 400 \text{ mm}$. Deci, volumul total al spațiului interior este $0,1 \text{ m}^3$. Bilele au volumul total $0,085 \text{ m}^3$, ocupând efectiv 85% din volumul disponibil. Restul de 15% reprezintă spațiile libere dintre bile, prin care circulă aerul cald de la baza spre bolta acumulatorului și, de asemenea, reprezintă spațiul liber dintre nivelul superior al coloanei de bile și boltă. Suprafața totală de schimb de căldură dintre aerul cald și bile este estimată la $S_{sch} = 13,9 \text{ m}^2$.

Transferul de căldură dintre aerul cald și bilele din șamotă se produce prin convecție. Coeficientul de transfer de căldură prin convecție (α_c) pentru curgere laminară se calculează cu următoarea relație [11]:

$$\alpha_c = 4,185 \cdot c (0,96 + 0,21 \cdot w \cdot d^{-0,6}) \cdot T^{0,25}, \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{grd} \quad (4)$$

unde:

c - coeficient de rugozitate a suprafeței canalelor ($c = 1$ pentru suprafețe netede);
 w - viteza aerului prin canale, m/s ($w = 3 \text{ m/s}$);
 T - temperatura medie a aerului între intrarea (505°C) și ieșirea din acumulator (350°C), K ($T = 273 + 427 = 700 \text{ K}$);
 d - diametrul hidraulic al canalelor acumulatorului, m .

$$d = 4a/u \quad (5)$$

unde:

a - secțiunea specifică liberă a canalelor raportată la secțiunea transversală a acumulatorului, m^2/m^2 ;
 u - perimetrul specific al canalelor raportat la secțiunea transversală a acumulatorului, m/m^2 .
 Deci:

$$d = 4 \cdot 0,0945 / 27,65 = 0,014 \text{ m}$$

The amount of steel produced in the electric arc furnace from Cermax 2000 Patents is 285 kg/charge and the corresponding amount of slag is 39.9 kg / charge. The duration of the charge is 2.5 hours and the duration of the discharge of the molten material from furnace is 10 minutes. The slag granulation with air occurs in this time.

The required amount of air, of $2.7 \text{ Nm}^3 / \text{kg}$ slag, i. e. $107.7 \text{ Nm}^3/\text{charge}$ is provided completely in the 10 minutes. So, the fan distributes a hourly air volume of: $107.7 \cdot 60 / 10 = 646.2 \text{ Nm}^3/\text{h}$, for 10 minutes.

According to calculus, the air enters into the heat accumulator at the temperature of 505°C . The dimensions of the enclosure of the experimental accumulator are: $500 \times 500 \times 400 \text{ mm}$. So, the total volume of the inner space is 0.1 m^3 . The balls have a total volume of 0.085 m^3 , effectively occupying 85% of the available volume. The remaining 15% represents free spaces between balls, whereby the warm air circulates from the bottom to the vault of accumulator and, also, represents the free space between the upper level of the balls column and the vault of accumulator. The total area of heat exchange between the warm air and balls is estimated at: $S_{sch} = 13.9 \text{ m}^2$.

The heat transfer between the warm air and chamotte balls is produced by convection. The coefficient of heat transfer by convection (α_c) for laminar flow is calculated with the following relationship [11]:

where:

c - coefficient of roughness of canals surface ($c = 1$ for smooth surfaces);
 w - the speed of air through canals, m/s ($w = 3 \text{ m/s}$);
 T - the average temperature of air between entrance (505°C) and exit (350°C), K ($T = 273 + 427 = 700 \text{ K}$);
 d - the hydraulic diameter of the accumulator canals, m .

where:

a - the free specific section of canals reported to the transversal section of accumulator, m^2/m^2 ;
 u - the specific perimeter of canals reported to the transversal section of accumulator, m/m^2 .
 So:

Prin urmare:

$$\alpha_c = 4,185 (0,96 + 0,21 \cdot 3 \cdot 0,014^{-0,6}) \cdot 700^{0,25} = 196,2 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{grd}$$

Cantitatea de căldură cedată de aerul cald de la 505°C (la intrarea în acumulator), la 350°C (la ieșirea din acumulator) se calculează cu relația [8]:

$$Q_{aer} = \alpha_c \cdot S_{sch} \cdot (t_{ai} - t_{ae}), \text{ kJ/h} \quad (6)$$

unde:

t_{ai} - temperatura de intrare în acumulator a aerului cald, °C ($t_{ai} = 505^\circ\text{C}$);

t_{ae} - temperatura de ieșire din acumulator a aerului, °C ($t_{ae} = 350^\circ\text{C}$ - temperatură estimată).

Deci:

$$Q_{aer} = 196,2 \cdot 13,9 \cdot (505 - 350) = 422713 \text{ kJ/h or: } 422713 \cdot 10 / 0,285 \cdot 60 = 247200 \text{ kJ / t steel}$$

Pentru a verifica corectitudinea estimării temperaturii aerului la ieșirea din acumulator, se compară valoarea Q_{aer} calculată cu relația (6), adică 247200 kJ/t oțel, cu valoarea Q_{aer} rezultată din ecuația de bilanț termic (2), adică:

$$Q_{aer} = \eta Q_{zg} = 0,9 \cdot 272542 = 245288 \text{ kJ / t oțel.}$$

Diferența dintre cele două valori ale Q_{aer} calculate prin metoda cantitativă (din ecuația 2) și, respectiv, prin metoda calitativă (relația 6), este foarte mică și confirmă justetea estimării temperaturii de 350°C a aerului la ieșirea din acumulator.

5. METODOLOGIA DE EXPERIMENTARE

Instalația experimentală este concepută să funcționeze în două etape distincte. În prima etapă se produce turnarea zgurii topite pe planul înclinat "spălat" de curentul puternic de aer. Zgura se granulează și se acumulează la baza instalației, iar aerul încălzit intră în acumulator pe la partea inferioară prin grătarul metalic, străbate canalele libere dintre bile, cedând o parte din căldură și iese pe la partea superioară, reîntorcându-se la baza coloanei de bile. Măsurătorile termotehnice constau în măsurarea debitului de aer insuflat (cu un debitmetru), a temperaturii aerului la ieșirea din acumulator (cu un termometru), a temperaturilor în centrul acumulatorului și la marginea coloanei de bile, măsurate cu termocuple de contact Fe - constantan, precum și a temperaturii medii a suprafețelor exterioare ale acumulatorului, măsurată cu camera de termografie.

Cea de-a doua etapă constă în determinarea experimentală a evoluției temperaturilor în centrul acumulatorului ceramic, la marginea coloanei de bile

Therefore:

The heat amount yielded by the warm air from 505°C (at the entrance into accumulator) to 350°C (at the exit from accumulator) is calculated with the relationship [8]:

where:

t_{ai} - the temperature of warm air at the entrance into accumulator, °C ($t_{ai} = 505^\circ\text{C}$);

t_{ae} - the temperature of air at the exit from accumulator, °C ($t_{ae} = 350^\circ\text{C}$ - estimated temperature).

So:

To verify the correctness of estimation of air temperature at the exit from accumulator, is compared the value of Q_{aer} calculated with the relationship (6), i.e. 247200 kJ/t steel with the value Q_{aer} resulted from the equation of thermal balance (2), i. e.

$$Q_{aer} = \eta \cdot Q_{zg} = 0.9 \cdot 272542 = 245288 \text{ kJ / t steel.}$$

The difference between the two values of Q_{aer} calculated by the quantitative method (from equation 2) and, respectively, by the quantitative method (relationship 6), is very little and confirms the correctness of air temperature estimation of 350°C at the exit from accumulator.

5. METHODOLOGY OF EXPERIMENTATION

The experimental installation is conceived to operate in two distinctive stage. In the first stage is carried out the casting of molten slag on the inclined plane "washed" by a strong current of air. The slag is granulated and is accumulated at the bottom of installation and the heated air enters at the bottom of accumulator, through the metallic grill, traverses the free canals of balls, giving some of his heat and exits on top, returning to the bottom of the balls column. The measurements consists in measuring of instilled air flow (with a flowmeter), air temperature at the exit of accumulator (with a thermometer), temperatures in the central area and at the edge of balls column of accumulator, measured with contact thermocouples Fe - constantan, as well as the average temperature of exterior surfaces of accumulator, measured with a thermographic camera.

The second stage consists in the experimental determination of temperatures evolution in the central area of the ceramic accumulator, at the edge of balls

și, respectiv, pe pereții exteriori ai acestuia la răcirea liberă (în condițiile închiderii clapetelor de ieșire a aerului cald). Această etapă trebuie să evidențieze capacitatea acumulatorului de a menține o temperatură medie suficient de ridicată, într-o durată cât mai lungă de timp, care să permită utilizarea eficientă a căldurii acumulate. Măsurătorile s-au efectuat la finalul încălzirii și, apoi, după 1, 5, 10, 15, 20 și 30 ore.

6. REZULTATELE EXPERIMENTALE

În **Tabelul 1** sunt prezentate rezultatele măsurătorilor termotehnice efectuate în timpul turnării și granularii zgurii de oțelărie, urmărindu-se evoluția temperaturilor aerului și bilelor ceramice din centrul și, respectiv, zona periferică (de lângă pereții laterali) a acumulatorului de căldură.

Tabelul 1. Parametri termotehnici în timpul procesului de granulare a zgurii
Table 1. Thermotechnical parameters during the slag granulation process

| Time minutes | Instilled air flow [Nm ³ /h] | Air temperature at the exit of accumulator [°C] | Ceramic balls temperature, °C | |
|--------------|---|---|-------------------------------|--------------------|
| | | | In central area | In peripheral area |
| 1 | 646.2 | 330 | 25 | 20 |
| 2 | 646.2 | 340 | 40 | 25 |
| 3 | 646.2 | 350 | 70 | 40 |
| 4 | 646.2 | 355 | 85 | 50 |
| 5 | 646.2 | 360 | 110 | 80 |
| 6 | 646.2 | 360 | 140 | 105 |
| 7 | 646.2 | 360 | 175 | 135 |
| 8 | 646.2 | 360 | 215 | 175 |
| 9 | 646.2 | 360 | 260 | 225 |
| 10 | 646.2 | 360 | 300 | 270 |

Conform datelor din **Tabelul 1**, debitul orar de aer insuflat pentru granulara zgurii a fost menținut constant la valoarea de 646,2 Nm³/h (calculat la § 4), care corespunde necesarului de 2,7 Nm³/kg zgură.

Evoluția temperaturii aerului la ieșirea din acumulatorul de căldură a fost una crescătoare pe durata celor 10 minute, având în vedere recircularea aerului cald la baza coloanei de bile a acumulatorului. Temperatura aerului a crescut de la 330°C (după primul minut al procesului de granulare), până la 360°C (după 5 minute), după care această valoare s-a menținut constantă.

Temperaturile măsurate în masa acumulatorului ceramic au avut o evoluție crescătoare pe durata celor 10 minute. În zona centrală a acumulatorului temperatura bilelor a crescut de la 25°C (după primul minut), la 300°C la finalul perioadei, iar în zona periferică de lângă perețele izolator al acumulatorului a crescut de la 20°C, până la 270°C.

Procesul de răcire liberă a acumulatorului a fost

column and, respectively, on the exterior walls of accumulator during the free cooling (given that the gate valves on the warm air outlet pipes are closed). This stage would emphasize the accumulator capacity to maintain a high enough average temperature, a longer period of time, allowing efficient use of heat accumulated. The measurements were carried out at the end heating and, then, after 1, 5, 10, 15, 20 and 30 hours.

6. EXPERIMENTAL RESULTS

In Table 1 are presented the results of thermo technical measurements carried out during casting and granulation of steelworks slag, following the evolution of air and ceramic balls temperatures of central area and, respectively, peripheral area (near the sidewalls) of the heat accumulator.

According to the data from Table 1, the hourly air flow instilled to slag granulate was maintained constant at the value of 646.2 Nm³/h (calculated in § 4), which corresponds to the need of 2.7 Nm³ / kg slag.

Air temperature evolution at the exit from the heat accumulator has been one ascending during the 10 minutes, given the warm air recirculation to the bottom of balls column of accumulator. The air temperature increased from 330°C (after the first minute of granulation process) up to 360°C (after 5 minutes), after that this value was maintained constant.

The temperatures measured into ceramic accumulator mass had an increasing trend during the 10 minutes. In the central area of accumulator the balls temperature increased from 25°C (after the first minute), to 300°C (at the end of the period) and in the peripheral area near the insulation wall of accumulator increased from 20°C up to 270°C.

urmărit imediat după finalizarea procesului de granulare a zgurii și după blocarea circuitelor de aer conform metodologiei de experimentare (§5). În **Tabelul 2** sunt prezentate rezultatele măsurătorilor evoluției temperaturilor acumulatorului până la răcirea acestuia.

Figura 2 prezintă grafic evoluția temperaturilor din axa centrală și, respectiv, de la marginea coloanei de bile ceramice pe durata celor 30 ore de răcire liberă a acumulatorului.

*The free cooling process of accumulator has been observed immediately after the end of slag granulation process and after blocking the air circuit, according to the experimentation methodology (§5). In **Table 2** are presented the results of the accumulator temperatures evolution up to its cooling. **Figure 2** shows graphically the temperature evolution from the central axis and, respectively, from the edge of ceramic balls column during the 30 hours of free cooling of accumulator.*

Tabelul 2. Evoluția temperaturilor interioare și exterioare ale acumulatorului în timpul răcirii libere

Table 2. The inlet and outlet temperatures of accumulator during the free cooling process

| Duration of the beginning of cooling hours | Temperature in the central area of accumulator [°C] | Temperature at the edge of accumulator balls column [°C] | Average temperature of balls [°C] | Temperature on the outlet walls of accumulator [°C] |
|--|--|---|--------------------------------------|--|
| 0 | 300 | 270 | 285 | 60 |
| 1 | 300 | 200 | 250 | 50 |
| 5 | 283 | 165 | 224 | 40 |
| 10 | 188 | 102 | 145 | 35 |
| 15 | 126 | 70 | 98 | 30 |
| 20 | 90 | 50 | 70 | 25 |
| 30 | 48 | 20 | 34 | 20 |

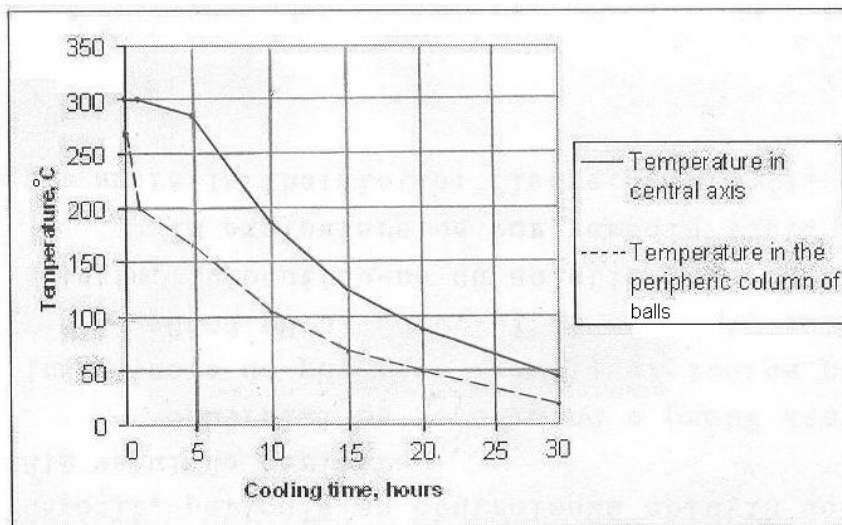


Fig. 2. Evoluția temperaturilor din axa centrală și, respectiv, de la marginea coloanei de bile ceramice pe durata răcirii libere
Evolution of temperature in the central axis and, respectively, from the edge of ceramic balls column during the free cooling process

Analizând datele din **Tabelul 2** se constată că acumulatorul testat de Cermax 2000 Patents poate fi o soluție viabilă pentru utilizarea căldurii fizice a zgurii de oțelărie pe o durată mult mai mare comparativ cu durata efectivă a turnării acesteia în stare topită. Astfel, timp de peste 5 ore de la începutul răcirii libere, temperatura medie a bilelor ceramice se menține la peste 200°C, utilizabilă în procese de uscare.

*Analyzing the data from **Table 2** it is found that the accumulator tested by Cermax 2000 Patents can be a viable solution to use the physical heat of steelworks slag for a period greater than the effective duration of its casting molten. Thus, over 5 hours from the beginning of the free cooling, the average temperature of ceramic balls is maintained to over 200°C, usable in drying processes.*

Viteza medie de răcire a bilelor acumulatorului pe durata celor 30 ore de răcire liberă este 8,4°C/h.

În primele 10 ore viteza de răcire este 14°C/h, în următoarele 10 ore ea scade la 7,5°C/h, pentru ca în ultimele 10 ore să coboare la valoarea de 3,6°C/h.

7. APLICAȚII ALE ACUMULATORULUI DE CĂLDURĂ

În cazul recuperării căldurii fizice a zgurii de oțelărie rolul acumulatorului de căldură constă în asigurarea conservării acestei energii termice pe o durată mult mai mare decât durata efectivă a turnării zgurii topite și posibilitatea utilizării ulterioare a acesteia. Desigur, randamentul recuperării căldurii zgurii este maxim dacă recuperarea se produce în același timp cu deversarea zgurii din cuptor. Deoarece acest deziderat este practic imposibil, acumularea energiei termice pe o durată cât mai lungă posibil constituie soluția optimă în acest caz.

Rezultatele experimentale privind capacitatea de conservare a energiei arată faptul că, în ciuda pierderilor de căldură prin pereții acumulatorului, rezerva de energie este, totuși, semnificativă după mai multe ore de acumulare și poate fi folosită în mod eficient în procese de uscare a materialelor.

Pentru a exemplifica acest fapt, s-a luat în considerare capacitatea acumulatorului de a oferi posibilitatea ca după 5 ore de la încheierea turnării zgurii să poată fi efectuată preîncălzirea și uscarea unui balot de cărămizi din șamotă cu umiditatea de 5%.

Conform datelor din **Tabelul 2**, temperatura medie a bilelor ceramice după o acumulare de 5 ore este de 224°C. Adoptând o răcire a bilelor până la 50°C și un randament al transferului de căldură între bile și aerul rece insuflat $\eta = 0,9$, se poate calcula [8] cantitatea de căldură disponibilă pentru efectuarea uscării materialelor.

$$Q_u = \eta \cdot M_b (c_{bi} \cdot t_{bi} - c_{bf} \cdot t_{bf}), \quad \text{kJ} \quad (7)$$

unde:

M_b - masa totală a bilelor acumulatorului, kg;

t_{bi} - temperatura inițială a bilelor, °C;

c_{bi} - căldura specifică a bilelor la temperatura inițială, kJ/kg · grd;

t_{bf} - temperatura finală a bilelor, °C;

c_{bf} - căldura specifică a bilelor la temperatura finală, kJ/kg · grd.

Așadar:

$$Q_u = 0,9 \cdot 85 \cdot (0,879 \cdot 224 - 0,824 \cdot 50) = 11911 \text{ kJ}$$

Considerând că aerul cald este utilizat în uscător pentru a preîncălzi până la 100°C balotul de cărămizi din șamotă și pentru a elimina integral umiditatea cărămizilor de 5%, se calculează cantitatea de cărămizi ce pot fi supuse uscării cu următoarea relație [8]:

The average speed of the accumulator balls cooling, during the 30 hours of free cooling, is 8.4°C/h.

In the first 10 hours the cooling speed is 14°C/h, in the following 10 hours it decreases to 7.5°C/h, for that, in the last 10 hours, to decrease to the value of 3.6°C/h.

7. APPLICATIONS OF THE HEAT ACCUMULATOR

In the case of physical heat recovery of steelworks slag the heat accumulator role consists to assure the conservation of this thermal energy on a duration more greater than the effective duration of the molten slag casting. Sure, the efficiency of heat slag recovery is maximum, if the recovery is carried out in the same time with the slag discharge from the furnace. Because this desideratum is practically impossible, the accumulation of thermal energy on a duration as long as possible constitutes the optimal solution in this case.

The experimental results concerning the energy conservation capacity indicate that, despite heat losses through accumulator walls, the energy reserve is, however, significant after several hours of accumulation and can be efficiently used in material drying processes.

To exemplify this, it was considered the accumulator capacity to offer possibility that after 5 hours from the end of slag casting process to can be carried out the preheating and drying of a chamotte bricks bale with a moisture of 5%.

*According to the data from **Table 2**, the average temperature of ceramic balls after an accumulation of 5 hours is 224°C. Considering a cooling of balls up to 50°C and a yield of the heat transfer between balls and the instilled cold air $\eta = 0.9$, it can be calculated [8] the available heat amount to carry out material drying.*

where:

M_b - the total mass of accumulator balls, kg;

t_{bi} - the initial temperature of balls, °C;

c_{bi} - the specific heat of balls at the initial temperature, kJ/kg · grd;

t_{bf} - the final temperature of balls, °C;

c_{bf} - the specific heat of balls at the final temperature, kJ/kg · grd.

So:

Considering that the warm air is used into dryer to preheat up to 100°C the chamotte bricks bale and to entirely remove the bricks moisture of 5%, it is calculated the bricks amount that can be dry with the following relationship [8]:

$$M_c = \eta \cdot Q_u / (c_{cf} \cdot t_{cf} - c_{ci} \cdot t_{ci} + 0,05 \lambda_{vap}), \text{ kg} \quad (8)$$

unde:

η - randamentul procesului de uscare;
 t_{cf} - temperatura finală a cărămizilor, °C;
 c_{cf} - căldura specifică a cărămizilor din șamotă la temperatura finală de încălzire, kJ/kg · grd;
 t_{ci} - temperatura inițială a cărămizilor, °C;
 c_{ci} - căldura specifică a cărămizilor la temperatura inițială, kJ/kg · grd;
 λ_{vap} - căldura latentă de vaporizare a apei din compoziția cărămizilor, kJ/kg.

Deci:

$$M_c = 0,9 \cdot 11911 / (0,837 \cdot 100 - 0,816 \cdot 20 + 0,05 \cdot 2498) = 56 \text{ kg}$$

Prin urmare, căldura acumulată după 5 ore de la încheierea procesului de turnare a zgurii este suficientă pentru preîncălzirea și eliminarea umidității de 5% a unei cantități de 56 kg cărămizi de șamotă. Acest exemplu de aplicare a tipului de acumulator de căldură propus de societatea Cermax 2000 Patents confirmă viabilitatea soluției de recuperare a căldurii zgurii de oțelărie. Desigur, în cazul cuptoarelor electrice cu arc de puteri mult mai mari și, implicit, a unor acumulatori cu capacități corespunzătoare cantităților mult mai mari de zgură produsă, efectele vor fi mai importante.

8. CONCLUZII

1. Zgura de oțelărie constituie un caz aparte între resursele energetice secundare cu potențial energetic ridicat din siderurgie, datorită repartiției neuniforme a cantităților relativ mici de zgură evacuate din cuptorul de topire.
2. Soluțiile cu largă aplicabilitate pe plan mondial vizează valorificarea zgurii de oțelărie ca material re folosibil în construcțiile civile, construcțiile de drumuri, fertilizări, industria cimentului etc.
3. Ținând seama de particularitățile zgurii de oțelărie, soluția adoptată de Cermax 2000 Patents SRL constă în utilizarea unui acumulator de căldură cu bile ceramice din șamotă, alimentat de aerul cald rezultat din contactul la viteză mare cu jetul de zgură topită.
4. Încălzirea acumulatorului se produce în timpul celor 10 minute cât durează turnarea zgurii topite, temperatura medie a bilelor ajungând la 285°C. Răcirea liberă a acumulatorului are loc în 30 ore, cu viteza medie de 8,4°C/h.
5. Acumulatorul de căldură este aplicabil în procese de uscare a materiilor prime și materialelor cu conținut ridicat de umiditate.
6. Rezultatele experimentale obținute pe o instalație de capacitate foarte mică (39,9 kg zgură/șarjă) au confirmat viabilitatea soluției adoptate.

where:

η - the yield of the drying process;
 t_{cf} - the final temperature of bricks, °C;
 c_{cf} - the specific heat of the chamotte bricks at the heating final temperature, kJ/kg · grd;
 t_{ci} - the initial temperature of bricks, °C;
 c_{ci} - the specific heat of bricks at the initial temperature, kJ/kg · grd;
 λ_{vap} - the latent heat of water vaporization from the bricks composition, kJ/kg.

So:

Therefore, the accumulated heat after 5 hours from the end of slag casting process is enough to preheat and remove the moisture of 5% of an amount of 56 kg chamotte bricks. This application example of the heat accumulator type proposed by the company Cermax 2000 Patents confirms the viability of heat recovery solution of steelworks slag. Sure, in the case of electric arc furnaces with much greater power and, implicitly, some accumulators with capacities corresponding to the amounts of slag much greater, the effects will be more important.

8. CONCLUSIONS

1. The steelworks slag constitutes a special case among the secondary energy resources with high energy potential of the iron and steel industry due the unevenly distribution of the relative little amount of slag discharged from the melting furnace.
2. The solutions with wide applicability in the world refer to revaluation of steelworks slag as recyclable material in civil constructions, road constructions, fertilizations, cement industry etc.
3. Considering the peculiarities of steelworks slag, the solution adopted by Cermax 2000 Patents SRL consists in using of a heat accumulator with chamotte balls, powered by the warm air resulting from the contact at high speed with the molten slag jet.
4. The heating of accumulator occurs during the 10 minutes how long it lasts casting slag, the average temperature of balls reaching 285°C. The free cooling of accumulator occurs in 30 hours, with the average speed of 8.4°C/h.
5. The heat accumulator is applicable in drying processes of raw materials with high contain of moisture.
6. The experimental results obtained on an installation wery little capacity (39.9 kg slag/ charge) confirmed the viability of adopted solution.

BIBLIOGRAFIE / REFERENCES

- [1] * * * - *Progress of the iron and steel technologies in the past decade*, Transaction of ISIJ, vol. 25, no. 7, 1985.
- [2] * * * - *Recuperation et utilisation economique des sous - produits de l'industrie siderurgique*, Commission Economique pour L'Europe, Nation Unies, New York, 1990.
- [3] **M. RYCROFT** - *Heat recovery from slag improves energy efficiency of furnaces*, Energize, April 2014.
www.ee.co.za
- [4] * * * - *Recycling of steel waste materials*, Steel Today & Tomorrow, News of Japanese Steel, Oct.-Dec. 1993.
- [5] **X. DAI, Y. QI, C. ZHANG** - *Development of molten slag dry granulation and heat recovery in steel industry*, Journal of Iron and Steel Research, vol. 20, 2008.
- [6] **H. ZANG, H. WANG, X. ZHU, Y.J. QIU, K. LI, R. CHEN, Q. LIAO** - *A review of waste heat recovery technologies towards molten slag in steel industry*, Applied Energy, 2013, Elsevier.
<http://www.sciencedirect.com>
- [7] **A. RĂU, I. TRIPȘA** - *Metalurgia oțelului*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1973.
- [8] **I.D. STĂNCESCU, V. ATHANASOVICI** - *Termoenergetică industrială*, Editura Tehnică, București, 1979.
- [9] **D. ȘTEFĂNESCU, M. MARINESCU, A. DĂNESCU** - *Transferul de căldură în tehnică*, Vol. I, Editura Tehnică, București, 1982.
- [10] **D. ȘTEFĂNESCU, A. LECA, L. LUCA, A. BADEA, M. MARINESCU** - *Transfer de căldură și masă*, Editura Tehnică, București, 1984.
- [11] **D. DOBROVICI, I. PRISECARU, M. BANCIU** - *Metalurgia fontei*, Editura Tehnică, București, 1966.