

ON THE OPPORTUNITY TO MANUFACTURING OF METALLIC BALLS WITH CAVITY BY CENTRIFUGAL CASTING

DESPRE OPORTUNITATEA FABRICAȚIEI BILELOR METALICE GOALE PRIN TURNARE CENTRIFUGALĂ

Marcel DĂIAN, Ioan CIOBANU, Aurel CRIȘAN

Transilvania University of Brasov, Romania

Abstract. A centrifugal casting procedure and installation with three axes of rotation were patented at Transilvania University of Braşov. This can be deployed for casting hollow metal balls. The advanced multiple-criteria analysis is conducted in order to evaluate the opportunity of using this casting procedure and installation for the manufacturing of mill balls. Seven procedures for mills balls manufacturing had been are comparing. The analysis shows so as to produce that balls by centrifugally casting has the highest performance coefficient.

Key words: multiple-criteria analysis, centrifugal casting, metal balls, ball mills

1. Aim of paper

A centrifugal casting installation of hollow metal balls was patented and manufactured at Transylvania University of Braşov [6]. The radius and wall thickness of the manufactured balls can be adjusted within a very wide interval. This procedure of hollow balls manufacturing is highly productive. The yield of liquid metal utilisation in casting is also major and the manufacturing costs are reduced.

The paper analyses the mill balls manufacturing opportunity by centrifugal casting. Comparatively with another the mill balls manufacturing procedures this procedure is evaluated. Hence, the utility of respectively device is analysed.

Therewith the paper aims to exemplify the advanced multiple-criteria analysis method implementation to industrially manufacturing procedures evaluate [1, 2, 3, 4]. It goes over the detailed steps of this comparatively analysis method.

2. Requirements for mill balls

Ball mills are used to ground mineral or organic materials. The balls are introduced into a cylindrical rotating shell together with the material to be ground. Usually, these are in form of clusters. By spinning the balls and clusters are first lifted. Then fall under their own weight, one over one another, on the bottom of the shell. Due to the kinetic energy and the impact forces, caused by the

Rezumat. La Universitatea Transilvania din Braşov a fost brevetat un procedeu și o instalație de turnare centrifugală cu trei axe de rotație. Aceasta poate fi utilizată pentru turnarea bilelor metalice goale. Este aplicată metoda analizei multi-criteriale avansate pentru evaluarea oportunității utilizării acestui procedeu în vederea obținerii bilelor destinate instalațiilor de măcinat. Au fost supuse analizei șapte procedee de fabricare a bilelor pentru morile de măcinat. Analiza a arătat că fabricarea prin turnare centrifugală are cel mai mare coeficient de performanță.

Cuvinte cheie: analiză criterială, turnare centrifugală, bile metalice, instalații de măcinat

1. Scopul lucrării

La Universitatea Transilvania din Braşov a fost brevetată și realizată o instalație de turnare centrifugală a bilelor metalice goale [6]. Raza și grosimea peretelui bilelor fabricate pot fi reglate în limite foarte largi. Acest procedeu de obținere a bilelor metalice goale are avantajul că asigură o productivitate ridicată. De asemenea randamentul utilizării metalului lichid la turnare este mare, iar costurile de fabricație sunt mai reduse.

În lucrare este analizată oportunitatea fabricării bilelor destinate morilor de măcinat prin acest procedeu. Se evaluează acest procedeu, în comparație cu alte procedee de fabricație a bilelor destinate morilor de măcinat. Se analizează astfel și utilitatea instalației respective.

În același timp lucrarea are ca scop să exemplifice aplicarea metodei de analiză multi-criterială avansată pentru evaluarea proceselor de fabricație a unor produse din domeniul construcției de mașini [1, 2, 3, 4]. Sunt parcurse detaliat etapele aplicării acestei metode de analiză comparativă.

2. Cerințe impuse bilelor de măcinat

Morile de măcinat cu bile sunt destinate măcinării unor materiale minerale sau organice. Bilele se introduc într-o cuvă cilindrică, rotativă, împreună cu materialele supuse măcinării. Materialele supuse măcinării sunt de obicei sub formă de bulgări sau aglomerări. Prin rotirea cuvei bilele și materialele supuse măcinării sunt ridicate, apoi ele cad unele peste altele, spre partea de jos a

balls falling over the clusters, the latter break into progressively smaller pieces until reaching the required dimensions, most often powder size [5].

Mass, dimensions and mechanical properties (shock and wear strength) of the balls depend on the material to be ground. No special requirements are imposed regarding dimensional precision and surface roughness. In the case of grinding minerals in mining or metallurgy (ores, coal, clay and similar materials) the required properties of balls include:

- high shock resistance;
- surface hardness (wear strength);
- adequate mass.

Typically the density of the materials used for balls is required to be as high as possible, such as to produce the greatest possible impact on the ground material. On the other hand, the large weight of the balls used in grinding increases the energy consumption.

The materials most frequently used for mill balls are cast iron and steel. In this case ball sizes ranging from 50 to 15 mm. At present the issue of reducing energy consumption in grinding has come to the fore. It needs to be correlated with ensuring the necessary impact force and an optimum geometry of the contact surface between the balls and ground material. This has yielded the idea of using hollow balls in mills. Thus the targeted reduced ball weight can be obtained while ensuring the ball geometry (radius) required for optimum grinding.

3. Steps of the advanced multiple-criteria analysis

The method of advanced multiple-criteria analysis is a mathematics-based scientific method designed for comparing any categories of products or activities. They can be compared objects or activities of all domains. Comparison is conducted in view of selecting an optimum solution for attaining a certain goal. The ranking of the products or activities subject to analysis is based on the calculation of a total value performance coefficient (FTV). This coefficient is computed as not all criteria of comparison are equally important in relation to the agreed objective. Hence, the criteria cannot have the same weighting in evaluating the performance of the analysed objects or activities.

incintei. Ca urmare a energiei cinetice și a forțelor de impact (cauzate de căderea bilelor asupra materialelor supuse măcinării), bulgării se sparg progresiv în particule de dimensiuni tot mai mici, până ajung la dimensiunile necesare, de cele mai multe ori sub formă de pulbere [5].

Bilele trebuie să aibă masă, dimensiuni și proprietăți mecanice (rezistență mecanică la șocuri și la uzare) în funcție de materialele supuse măcinării. Nu sunt impuse condiții speciale privind precizia dimensională și rugozitatea suprafețelor. În cazul măcinării materialelor minerale, în industria minieră sau metalurgică (minereuri, cărbune, argilă sau altele similare) caracteristicile cerute bilelor sunt:

- rezistență ridicată la șocuri;
- duritate superficială (rezistență la uzare);
- masă corespunzătoare.

De obicei se cere ca densitatea materialului utilizat la confecționarea bilelor să fie cât mai mare pentru ca la cădere să producă o forță de impact cât mai mare asupra produsului măcinat. Pe de altă parte, greutatea mare a bilelor utilizate pentru măcinare influențează negativ consumul de energie.

Materialele cele mai des folosite la realizarea bilelor pentru mori de măcinat sunt fonta și oțelul. În acest caz dimensiunile bilelor sunt de ordinul 50 – 15 mm. În ultimul timp, se pune tot mai mult problema reducerii consumului de energie la măcinare. Această tendință trebuie corelată cu asigurarea forțelor de impact necesare și a unei geometrii optime a suprafețelor de contact dintre bile și materialul supus măcinării. Ca urmare a apărut ideea utilizării în morile de măcinat a unor bile goale în interior. Astfel, este posibilă corelarea greutății bilelor cu geometria (raza de curbura) lor pentru a asigura condiții optime pentru măcinare.

3. Etapele analizei multi-criteriale avansate

Analiza multi-criterială avansată este o metodă științifică matematizată, destinată comparării unor categorii de produse sau activități. Pot fi comparate produse sau activități din orice domeniu. Compararea se efectuează în vederea ierarhizării produselor analizate în raport cu atingerea unui scop. Ierarhizarea produselor sau a activităților supuse analizei este bazată pe calculul unui coeficient valoric total de performanță (FTV) al acestora în raport cu obiectivul urmărit. Se are în vedere că nu toate criteriile de comparație au aceeași importanță pentru atingerea obiectivului. Ca urmare criteriile nu pot avea aceeași pondere în evaluarea performanțelor obiectelor sau a activităților analizate.

The steps of this analysis method [1, 2, 3, 4]:

- 1 – Identifying and characterisation of the possible variants of products or activities to be considered by the analysis;
- 2 – Establishing the criteria of comparison;
- 3 – Establishing the importance of the criteria and their weighting within the analysis;
- 4 – Analysis of the studied variants in relation to the criteria of comparison;
- 5 – Computation of the total value performance coefficient and ranking of the analysed variants.

Further on these steps, the mill balls manufacturing by centrifugal casting is evaluated, relatively to another procedures.

4. Identifying and characterisation of the mill balls manufacturing processes

Seven manufacturing procedures are evaluated by this analysis method:

- P1 – Manufacturing (hollow) metal balls by centrifugal casting;
- P2 – Manufacturing (solid) metal balls by gravity casting in sand moulds;
- P3 – Manufacturing (solid) metal balls by die-forming;
- P4 – Manufacturing (hollow) metal balls by casting of semi-balls and assembling by welding;
- P5 – Manufacturing (hollow) metal balls by forging of semi-balls and assembling by welding;
- P6 – Manufacturing (hollow) metal balls by casting of semi-balls and mechanical assembly (by screws);
- P7 – Manufacturing (hollow) metal balls by forging of semi-balls and mechanical assembly (by screws).

The analysis claims to know the advantages and disadvantages and such the particularity of these procedures. Further and shortly, they are show.

The centrifugal casting of hollow balls (P1) requires a centrifugal casting installation with simultaneous rotation by three axes. Generally, centrifugal casting installations do not require large investments. Casting is done in metal chills. They have a relatively simple construction. The procedure allows the manufacturing of balls from any material. Further, balls with superficial gradient properties can be obtained (e.g. balls with a superficial layer of white cast iron). The efficiency of liquid metal utilisation in casting is high. Productivity is high. Manufacturing costs is reduced.

Etapetele analizei multicriteriale avansate sunt [1, 2, 3, 4]:

- 1 – Identificarea și caracterizarea variantelor de produse sau de activități luate în considerare în cadrul analizei;
- 2 – Stabilirea criteriilor de comparație;
- 3 – Stabilirea importanței criteriilor și a ponderii acestora în cadrul analizei;
- 4 – Analiza variantelor supuse studiului în raport cu criteriile de comparație;
- 5 – Calculul indicelui valoric total de performanță și ierarhizarea variantelor analizate.

În continuarea acestei etape se face evaluarea fabricării bilelor destinate morilor de măcinat prin turnare centrifugală în comparație cu alte procedee.

4. Identificarea și caracterizarea procedeeleor de realizare a bilelor de măcinat

Au fost evaluate prin această metodă de analiză următoarele șapte procedee de fabricație:

- P1 – Realizarea bilelor metalice (goale) prin turnare centrifugală;
- P2 – Realizarea bilelor metalice (pline) prin turnare gravitațională în forme din amestec de formare;
- P3 – Realizarea bilelor metalice (pline) prin matrițare;
- P4 – Realizarea bilelor metalice (goale) prin turnare de semibile și asamblare prin sudare;
- P5 – Realizarea bilelor metalice (goale) prin forjare de semibile și asamblare prin sudare;
- P6 – Realizarea bilelor metalice (goale) prin turnare de semibile și asamblare mecanică (prin șuruburi);
- P7 – Realizarea bilelor metalice (goale) prin forjare de semibile și asamblare mecanică (prin șuruburi).

Pentru efectuarea analizei este necesară cunoașterea tuturor aspectelor legate de avantajele, dezavantajele și particularitățile implicate de fiecare dintre aceste procedee. Acestea sunt prezentate pe scurt în continuare.

Turnarea centrifugală de bile goale (P1) necesită o instalație de turnare centrifugală cu rotație simultană după două sau trei axe. În general instalațiile de turnare centrifugală nu necesită investiții mari. Turnarea se realizează în cochile metalice. Acestea au o construcție simplă. Se pot obține bile din orice material. Este posibilă obținerea de bile cu gradient de proprietăți la suprafață (de exemplu bile din fontă cenușie cu strat superficial din fontă albă). Randamentul de utilizare al metalului lichid la turnare este foarte mare. Aceasta este posibil deoarece nu sunt necesare rețele de turnare. Productivitatea este ridicată. Costurile de fabricație sunt reduse.

Manufacturing of full metal balls by gravity casting in sand moulds (P2). This is the most frequently utilised procedure in industry. Casting can be manual casting (in less equipped shops) or mechanised (in modern foundries). The manufacturing of hollow balls by this procedure is not recommended, as it would entail using inner cores. The utilisation of cores would considerably complicate the technological process (due to core manufacturing, assembling in the mould and eventually their extraction). The casting of full balls is achieved by means of simple equipment (models, mole supporting plates, etc.). Are necessary equipment currently existing inner foundry. No investment in installations is required. The manufacturing of balls with structure and property gradient (as in the case of cast-iron parts) would entail using exterior coolers, what would significantly complicate the technological process. Defects known as “displacement in the separation plane” could occur. The yield of liquid metal utilisation in casting is small because of the gatings. Casting in sand moulds also impacts on the environment (polluted foundry shop atmosphere and the quantity of moulding materials removed from the technological flow).

Forging or die-forming full metal balls (P3). Forging (die-forming) is a widely deployed procedure in industry. The procedure includes operations like cutting, heating, die-forging, deburring and finishing. This procedure is not suited for the manufacturing of balls of any material (e.g. from cast iron or other fragile and brittle materials). Productivity is high, but beneath that of centrifugal casting. This procedure require a forging hammer or press, equipments currently existing inner forging - pressing works. The devices (dies) are subject to strong dynamic strain and increased wear. The dies are complex and cost-intensive.

Manufacturing (hollow) metal balls by casting of semi-balls and assembling by welding (P4). The advantages and disadvantages are the same as in procedure P2. The casting of semi-balls and their subsequent welding together, while holding the benefit of manufacturing hollow balls by casting has the disadvantage of additional operations (welding and finishing). This causes a decrease in productivity and increased manufacturing costs.

Manufacturing (hollow) metal balls by forging of semi-balls and assembling by welding (P5) involves the same advantages and disadvantages as

Turnarea gravitațională de bile pline în forme din amestec de formare (P2). Este procedeul de turnare cel mai răspândit în construcția de mașini. Poate fi aplicat sub formă de turnare manuală (în ateliere mai puțin echipate) sau sub formă mecanizată (în turnătorii moderne). Obținerea de bile goale prin acest procedeu nu este recomandată deoarece ar necesita folosirea de miezuri interioare. Utilizarea de miezuri ar complica considerabil procesul tehnologic (este necesară execuția miezurilor, asamblarea în formă, extragerea miezurilor din piese după turnare). În cazul turnării de bile pline dispozitivele sunt simple (modele, plăci portmodel etc.). Se utilizează instalațiile existente în mod curent în turnătorii. De aceea nu sunt necesare investiții în instalații. Obținerea de bile cu gradient de structură și proprietăți (în cazul pieselor din fontă) ar necesita utilizarea de răcitori exteriori, ceea ce ar complica mult procesul tehnologic. Pot să apară defecte de turnare de tip “deplasarea în planul de separație”. Randamentul utilizării metalului lichid la turnare este redus, datorită rețelelor de turnare. Procedeul de turnare în forme pe bază de nisip are impact negativ asupra mediului înconjurător (prin poluarea atmosferei în ateliere de turnare și prin cantitatea de materiale de formare scoase fluxul tehnologic).

Forjarea sau matrișarea la cald a bilelor metalice pline (P3). Forjarea (matrișarea) este un procedeu de fabricație mult utilizat în construcția de mașini. Obținerea bilelor prin acest procedeu cuprinde ca operații debitarea, încălzirea, matrișarea, debavurarea, ajustarea. Acest procedeu nu permite obținerea bilelor din orice material (de exemplu din fontă sau alte materiale fragile sau cu plasticitate redusă). Productivitatea este ridicată, dar mai redusă decât la turnarea centrifugală. Utilajele necesare sunt ciocane de matrișat sau prese, utilaje care există curent în atelierele de forjare - matrișare. Dispozitivele (matrișele) sunt supuse la solicitări dinamice puternice și au grad de uzare ridicat. Matrișele sunt mai complexe, trebuie executate din aliaje speciale și au costuri mai ridicate.

Realizarea bilelor metalice (goale) prin turnare de semibile și asamblare prin sudare (P4). Implică aceleași avantaje și dezavantaje ca și procedeul P2. Turnarea de semibile și asamblarea ulterioară prin sudare are avantajul că se pot obține bile goale prin turnare, dar apare dezavantajul introducerii unei operații suplimentare (sudare și ajustare). Aceasta conduce la scăderea productivității și la creșterea costurilor de fabricație.

Realizarea bilelor metalice (goale) prin forjare de semibile și asamblare prin sudare (P5). Implică aceleași avantaje și dezavantaje ca și procedeul P3.

procedure P3. Die-forging of semi-balls subsequently welded together has the advantage of obtaining hollow balls by plastic forming, while incurring the same disadvantage of additional operations (welding and finishing) impacting on productivity and manufacturing costs.

The two latter variants – manufacturing (hollow) metal balls by casting of semi-balls and mechanical assembly (by screws) (P6) and manufacturing (hollow) metal balls by forging of semi-balls and mechanical assembly (by screws) (P7), respectively – are similar to variants (P4) and (P5), respectively regarding the manufacturing of the semi-balls. They differ by the modality of their assembling and fastening inside hollow balls. Assembling and fastening by screws is less productive and more cost-intensive than welding.

5. Establishing and ranking the criteria of comparison

The criteria of comparison detailed below were established by taking into consideration the requirements of mill balls:

- C1 – material consumption per product unit;
- C2 – duration of execution per product unit (productivity);
- C3 – manufacturing cost per product unit;
- C4 – cost of the necessary devices per product unit;
- C5 – impact on the environment;
- C6 – the possibility of processing adequate materials for mill balls;
- C7 – the possibility of ensuring the properties required for adequate deployment (hardness, wear strength, ball mass) of the end-product at lowest possible costs;
- C8 – the investment required for the implementation of the process (investment for devices, equipment, etc. per product unit);
- C9 – reliability of the end-product (service life, time until removal of the balls from operation);
- C10 – work safety (risk of accidents during manufacturing).

The criteria established for the comparative analysis of the manufacturing variants are not equally important. The importance (weighting) of the criteria in view of their ranking is set by calculating “weighting coefficients” Y_i . The weighting of the criteria is set according to a “3-point-grid” (the corresponding values being “0”, “0.5” and “1”). A square table is set up, with the same number of rows and columns equal to the number of criteria N_{CRT} . (The number of criteria N_{CRT} in the present study is $N_{CRT} = 10$).

Matrișarea de semibile și asamblarea ulterioară prin sudare are avantajul că se pot obține bile goale prin deformare plastică, dar apare același dezavantaj al unor operații suplimentare (sudare și ajustare) cu implicații asupra productivității și costurilor de fabricație.

Ultimile două variante – realizarea bilelor metalice (goale) prin turnare de semibile și asamblare mecanică (prin șuruburi) (P6) și respectiv realizarea bilelor metalice (goale) prin forjare de semibile și asamblare mecanică (prin șuruburi) (P7) – sunt asemănătoare cu variantele (P4) și respectiv (P5) din punct de vedere al obținerii semibilelor. Ele diferă prin modul de asamblare și rigidizare a acestora în bile goale la interior. Asamblarea și rigidizare prin șuruburi este mai puțin productivă și mai costisitoare decât solidarizarea prin sudare.

5. Stabilirea și ierarhizarea criteriilor de comparație

Având în vedere cerințele care se impun bilelor destinate morilor de măcinat s-au stabilit următoarele criterii de comparație:

- C1 – consum de materiale pe unitate de produs;
- C2 – durată de execuție pe unitate de produs (productivitate);
- C3 – cost manoperă de fabricație pe unitate de produs;
- C4 – cost dispozitive necesare pe unitate de produs;
- C5 – impact asupra mediului;
- C6 – posibilitate de a prelucra materialele adecvate realizării bilelor pentru mori de macinat;
- C7 – posibilitate de a asigurare proprietățile de utilizare (duritate, rezistență la uzare, masa bilei) ale produsului final cu costuri cât mai reduse;
- C8 – investiții necesare pentru implementarea procedurii (în dispozitive, utilaje, etc. pe unitate de produs);
- C9 – fiabilitatea produsului final (durata de funcționare, de scoatere a bilelor din uz);
- C10 – protecția muncii (pericol de accidente în timpul procesului de fabricație).

Criteriile stabilite pentru analiza comparativă a variantelor de fabricație analizate nu au aceeași importanță. Cuantificarea importanței (ponderii) criteriilor în vederea ierarhizării acestora se face prin calculul unor „coeficienți de pondere” Y_i . Ponderele criteriilor se stabilește pe o “grilă cu 3 valori” (valorile sunt “0”, „0,5” și „1”). Se lucrează tabelar. În acest scop se alcătuește un tabel pătratic, având numărul liniilor egal cu numărul coloanelor și egal cu numărul criteriilor N_{CRT} (N_{CRT} reprezintă numărul criteriilor, în cazul de față $N_{CRT} = 10$).

The criteria are compared two by two, and of each such pair the one more important for evaluating the analysed variants established. Each criterion on a row is compared to each criterion of a column and a value (a coefficient) is assigned according to the criterion's qualitative importance. The table is filled in by the following rules:

- If the criterion on a given row is more important than the criterion on the corresponding column, it is assigned value "1";
- If the criterion on a given row is equally important as the criterion on the corresponding column, it is assigned value "0.5";
- If the criterion on a given row is less important than the criterion on the corresponding column, it is assigned value "0".
- When a criterion is compared to itself, value 0.5 is assigned. Hence the main diagonal of the matrix will display values 0.5.

The sum of all values of such a table is always equal to half of the squared number of criteria. Further on along each row the points assigned to each criterion are added. Thus the obtained scores by each criterion are establishing. The criteria are ranked by their scores. A level of importance is assigned according to the position held in this hierarchy. If two or more criteria obtain the same score, the position held will be the same and is computed as the arithmetic mean of the positions held by these criteria. For example, if two criteria obtain the same score and rank on positions 2 and 3, then the level of importance assigned to them is 2.5. If three criteria are on positions 3, 4 and 5, all three will be assigned score 4.

Further, in according to the obtained values concerning criterion importance analysis, is calculated the weighting coefficient of the criteria. The weighting coefficients "Y_i" of the criteria can be computed by various mathematical formulae. Globally recognised the "FRISCO formula", an empiric relationship developed by a San Francisco creation group:

$$Y_i = \frac{p + m + 0.5 + |\Delta p|}{|\Delta p| + N_{CRT} / 2}, \quad (1)$$

where:

- p – the sum of points obtained by the considered criterion on a row;
- Δp – the difference between the score of the considered criterion and the score of the criterion ranking last. If the considered criterion is exactly the last ranking one, Δp will be "0";

Criteriile se compară două câte două, stabilind care dintre ele este mai important pentru evaluarea variantelor analizate. Fiecare criteriu de pe o linie este comparat cu fiecare criteriu de pe coloană acordându-se o valoare (un coeficient) în raport cu importanța calitativă a acestora. Completarea tabelului se face după regulile următoare.

- Dacă criteriul de pe linie este mai important decât cel de pe coloană, în tabel se atribuie valoarea „1”;
- Dacă criteriul de pe linie este la fel de important ca și cel de pe coloană, se atribuie valoarea „0,5”;
- Dacă criteriul de pe linie este mai puțin important decât cel de pe coloană, se atribuie valoarea „0”.
- Când un criteriu se compară cu el însăși se atribuie valoarea 0,5. În consecință matricea rezultată are pe diagonala principală valorile 0,5.

Suma tuturor valorilor dintr-un astfel de tabel este totdeauna egală cu jumătate din pătratul numărului de criterii. În continuare se însumează pe fiecare linie punctele din dreptul fiecărui criteriu. Se stabilește astfel numărul punctelor obținute de fiecare criteriu. Se ordonează criteriile în funcție de punctajul obținut. Importanța unui criteriu este dată de locul ocupat în acest clasament. Locul ocupat reprezintă numărul de nivel al importanței criteriului respectiv. Dacă două sau mai multe criterii obțin același număr de puncte, numărul locului ocupat este același și se calculează ca fiind media aritmetică a locurilor care revin acestor criterii. De exemplu, dacă două criterii obțin același punctaj și le revin în clasament locurile 2 și 3, atunci numărul de nivel al importanței care se atribuie este 2,5. Dacă trei criterii ocupă locurile 3, 4 și 5, la toate trei se atribuie punctajul 4.

În continuare pe baza rezultatelor obținute la analiza importanței criteriilor se calculează coeficientul de pondere al criteriilor. Coeficienții de pondere "Y_i" al criteriilor se pot calcula cu diverse relații matematice. Relația recunoscută pe plan mondial ca fiind cea mai performantă este numită "relația FRISCO" (relație empirică dată de un grup de creație din San – Francisco, USA):

unde:

- p – suma punctelor obținute pe linie de criteriul respectiv;
- Δp – diferența dintre punctajul criteriului luat în calcul și punctajul criteriului de la ultimul nivel (ultimul loc în clasament). Dacă elementul luat în calcul este chiar cel situat pe ultimul nivel, rezultă valoarea "0";

- m – the number of outranked criteria, i.e. the number of criteria with lesser scores than the considered criterion;
- 0.5 – fixed coefficient;
- N_{CRT} – the total number of considered criteria (in this study $N_{CRT} = 10$).
- $\Delta p'$ – the difference between the score of the considered criterion and the criterion ranking first (the value of $\Delta p'$ will be negative). If the considered criterion ranks first, then $\Delta p'$ will be 0.

Conducting an objective and correct comparison of the relative importance of the criteria is decisive for the final result of the analysis. Table 1 illustrates the qualitative comparison of the relative importance of the above described criteria in view of analysing the performance of the manufacturing variants of mill balls. Table 2 features the computed results of the weighting coefficients assigned to the criteria.

- m – numărul criteriilor surclasate (criterii care au punctaj mai mic decât elementul respectiv);
- 0.5 – coeficient fix;
- N_{CRT} – numărul total de criterii luat în considerare (în cazul de față $N_{CRT} = 10$).
- $\Delta p'$ – diferența dintre punctajul criteriului luat în calcul și punctajul criteriului de pe primul loc (rezultă o valoare negativă). Dacă elementul luat în calcul este situat pe primul loc (nivel) atunci pentru $\Delta p'$ rezultă valoarea "0".

Compararea obiectivă și corectă a importanței relative a criteriilor este determinantă pentru rezultatul final al analizei. Compararea calitativă a importanței relative a criteriilor nominalizate mai sus în vederea analizei performanțelor variantelor analizate în cazul variantelor de fabricare a bilelor destinate morilor de măcinat este dată în Tabelul 1. În Tabelul 2 sunt date rezultatele privind calculul coeficientului de pondere al criteriilor.

Table 1. Results of the individual comparison of criteria importance for the seven analysed variants

Tabelul 1. Rezultatele comparației individuale a importanței criteriilor pentru analiza variantelor de fabricație analizate

Criteria C_i	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	Total Score (points) p	Rank
C1	0.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1.0	1.0	0.5	1.0	1.0	8.0	1, 2, 3, 4
C2	0.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1.0	1.0	0.5	1.0	1.0	8.0	1, 2, 3, 4
C3	0	0	0.5	0	1.0	1.0	1.0	0	0	0	3.5	7
C4	0.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1.0	1.0	0.5	1.0	1.0	8.0	1, 2, 3, 4
C5	0	0	0	0	0.5	1.0	0	0	0	0	1.5	9
C6	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0.5	10
C7	0	0	0	0	1.0	1.0	0.5	0	0	0	2.5	8
C8	0.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1.0	1.0	0.5	1.0	1.0	8.0	1, 2, 3, 4
C9	0	0	1.0	0	1.0	1.0	1.0	0	0.5	0.5	5.0	5, 6
C10	0	0	1.0	0	1.0	1.0	1.0	0	0.5	0.5	5.0	5, 6

Table 2. Computed results of the weighting coefficients Y_i assigned to the criteria

Tabelul 2. Rezultatele calculului coeficienților de pondere Y_i asociați criteriilor

Criteria C_i	Score, p	Mean rank, i	$\Delta p = p - p_{min}$	Number of outranked criteria, m	Total number of criteria, N_{CRT}	$\Delta p' = p - p_{max}$	Weighting coefficient, Y_i
C1	8.0	2.5	7.5	6	10	0	4.400
C2	8.0	2.5	7.5	6	10	0	4.400
C3	3.5	7.0	3.0	3	10	- 4.5	1.315
C4	8.0	2.5	7.5	6	10	0	4.400
C5	1.5	9.0	1.0	1	10	- 6.5	0.347
C6	0.5	10.0	0	0	10	- 7.5	0.080
C7	2.5	8.0	2.0	2	10	- 5.5	0.666
C8	8.0	2.5	7.5	6	10	0	4.400
C9	5.0	5.5	4.5	4	10	- 3.0	1.750
C10	5.0	5.5	4.5	4	10	- 3.0	1.750

Remark / Observație: $p_{max} = 8$, $p_{min} = 0.5$

6. Analysis of the extent to that the considered variants satisfy the criteria

This step of the multiple-criteria analysis entails assigning grades or scores (N_{ji}) to the analysed variants (index J) as to how they satisfy each criterion (index i). The grades scores are also known as ‘importance scores’ or ‘contribution scores’ of each criterion. They have to be integers from 1 to 10. Each variant is analysed in turn, in the sequence of index “ J ” (here “ J ” ranks from 1 to 7) and scores are assigned in relation to each criterion in the sequence of index “ i ” (here “ i ” ranks from 1 to 10), until all variants and criteria are exhausted. The scores N_{ji} awarded to the seven mill ball manufacturing variants are analysed in Table 3. The scores were awarded based on the advantages and disadvantages entailed by each objective in relation to each criterion.

6. Analiza îndeplinirii criteriilor de către variantele analizate

În cadrul acestei etape a analizei multi-criteriale se acordă note N_{ji} pentru variantele analizate (indice J) în raport cu satisfacerea fiecărui criteriu de analiză (indice i). Notele acordate se mai numesc note de importanță sau note de contribuție a fiecărui criteriu. Notele trebuie să fie un număr întreg de la 1 la 10. Se analizează pe rând fiecare variantă (indice “ J ”, în cazul de față $J = 1-7$) și se acordă notă în raport cu fiecare criteriu (indice “ i ”, în cazul de față $i = 1-10$) până se epuizează toate variantele și toate criteriile. Notele N_{ji} acordate celor șapte variante de fabricație a bilelor, analizate sunt date în Tabelul 3. Aceste note s-au acordat pe baza avantajelor și a dezavantajelor implicate de fiecare obiectiv în raport cu fiecare criteriu de analiză.

Table 3. Scores N_{ji} awarded to the seven studied variants in relation to each criterion, C_i

Criterion	Score N_{ji} awarded to each procedure, matched against each criterion C_i Nota N_{ji} acordată fiecărui procedeu, în funcție de îndeplinirea criteriului C_i						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
C1	9	10	10	9	8	10	10
C2	10	9	9	10	9	8	7
C3	10	8	6	6	10	3	2
C4	10	9	10	8	9	7	5
C5	7	8	9	8	7	10	10
C6	5	7	8	8	4	9	9
C7	10	10	10	10	10	8	7
C8	10	9	10	9	10	9	9
C9	9	9	10	9	10	8	6
C10	10	10	10	10	10	10	8

Remark: Scores were awarded according to the each variant’s degree of compliance with the given criterion.
Observație: Notele au fost acordate după modul în care fiecare variantă satisface criteriul respectiv.

7. Calculation of the total value performance factor and ranking of the analysed variants (The consequence matrix)

This calculation is performed in a table called “the consequence matrix”. For each analysed variant of manufacturing procedure matched against each criterion a final value factor “ F_{ji} ”, called “performance factor”, is computed. This is the product of the awarded score N_{ji} (Table 3) and the weighting coefficient of the respective criterion, Y_i (computed in Table 2):

$$F_{ji} = Y_i \cdot N_{ji}, \quad i = 1...10; \quad J = 1...7, \tag{2}$$

where “ J ” is the index of the variant and “ i ” is the index of the criterion.

Then, for each variant the sum of these factors is computed, yielding a total value factor “ FTV_j ”. The equation utilised is:

7. Calculul factorului valoric total de performanță și ierarhizarea variantelor analizate (calculul matricei consecințelor)

Acest calcul se efectuează într-un tabel numit “matricea consecințelor”. Pentru fiecare variantă de procedeu de fabricație analizat, în raport cu fiecare criteriu, se calculează un factor valoric final “ F_{ji} ”, numit factor de performanță. Acesta reprezintă produsul dintre nota acordată N_{ji} (din Tabelul 3) și coeficientul de pondere al criteriului Y_i (calculat în Tabelul 2):

unde J reprezintă indicele variantei, iar i indicele criteriului.

Apoi pentru fiecare variantă se calculează suma acestor factori obținând un factor valoric total al variantelor analizate “ FTV_j ”:

$$FTV_J = \sum_{i=1}^{i=10} F_{Ji} \cdot \tag{3}$$

According to the values of this factor (performance coefficient) the final ranking of the analysed variants is established. First ranks the variant with the highest value of FTV_J . If the values of the total coefficients FTV_J (the sum of the scores) of some of the variants are close, those variants ensure similar performance. Table 4 shows the values of the performance coefficients F_{Ji} and of the total value coefficient FTV_J for all analysed mill ball manufacturing variants, computed by equations (2) and (3). The value of the total performance coefficient FTV_J is given on the last row of Table 4. Figure 1 shows the results represented as histograms.

Pe baza valorilor acestui coeficient de performanță total se stabilește clasamentul final al variantelor analizate. Pe primul loc se va situa varianta care are valoarea cea mai mare a factorului valoric total FTV_J . Dacă valorile coeficienților totali FTV_J (valoarea sumei punctajelor) ai unor variante, sunt apropiate, înseamnă că variantele respective asigură performanțe apropiate. Valorile coeficienților de performanță F_{Ji} și a coeficientului valoric total FTV_J , pentru variantele de fabricație a bilelor analizate în cadrul acestui studiu, calculate prin relațiile (2) și (3), sunt date în Tabelul 4. Valoarea coeficientului total de performanță FTV_J este dată pe ultima linie din Tabelul 4. Rezultatele obținute sunt reprezentate grafic în Figura 1, sub formă de histogramă.

Table 4. Values of the performance coefficients F_{Ji} corresponding to each criterion and of the total value factor FTV_J for the analysed manufacturing procedures

Tabelul 4. Coeficienții de performanță pentru fiecare criteriu F_{Ji} și factorul valoric total FTV_J pentru procedeele de fabricație analizate

	W.Coef.	P1		P2		P3		P4		P5		P6		P7	
C_i	γ_i	N_i	$\gamma_i \cdot N_i$	N_i	$\gamma_i \cdot N_i$	N_i	$\gamma_i \cdot N_i$	N_i	$\gamma_i \cdot N_i$	N_i	$\gamma_i \cdot N_i$	N_i	$\gamma_i \cdot N_i$	N_i	$\gamma_i \cdot N_i$
C1	4.400	9	39.6	10	44	10	44	9	39.6	8	35.2	10	44	10	44
C2	4.400	10	44	9	39.6	9	39.6	10	44	9	39.6	8	35.2	7	30,8
C3	1.315	10	13.15	8	10.52	6	7.89	6	7.89	10	13.15	3	3.94	2	2,63
C4	4.400	10	44	9	39.6	10	44	8	35.2	9	39.6	7	30.8	5	22
C5	0.347	7	2.42	8	2.77	9	3.12	8	2.77	7	2.42	10	3.47	10	3,47
C6	0.080	5	0.4	7	0.56	8	0.64	8	0.64	4	0.32	9	0.72	9	0,72
C7	0.666	10	6.66	10	6.66	10	6.66	10	6.66	10	6.66	8	5.28	7	4,62
C8	4.400	10	44	9	39.6	10	44	9	39.6	10	44	9	39.6	9	39,6
C9	1.750	9	15.75	9	15.75	10	17.5	9	15.75	10	17.5	8	14	6	10,5
C10	1.750	10	17.5	10	17.5	10	17.5	10	17.5	10	17.5	10	17.5	8	14
Total value factor FTV_J			227.48		216.56		224.91		209.51		215.95		194.61		172.34

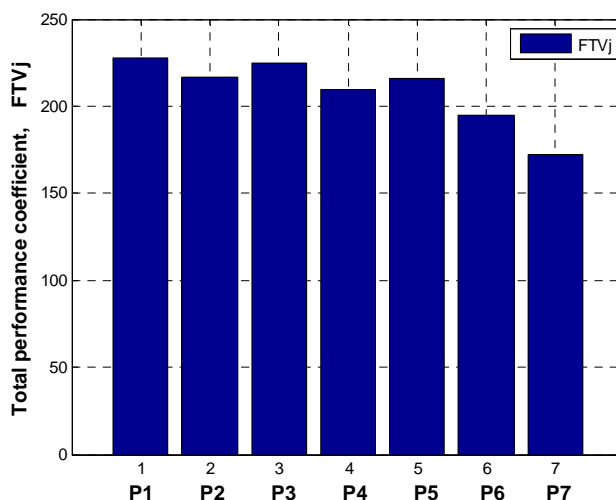


Figure 1. The total value performance coefficient (factor), FTV_J , for the analysed manufacturing variants
 Figura 1. Coeficientul valoric total de performanță, FTV_J , pentru variantele de procesare analizate

9. Conclusions

The multiple-criteria analysis reveals, upon totalising, that the variant with the highest total performance coefficient ($FTV_J = 227.48$), that is the variant that satisfies best all considered criteria, is P1 – manufacturing (hollow) mill balls by centrifugal casting. Also variants P3 – manufacturing (solid) balls by forging and P2 – manufacturing (solid) metal balls by gravity casting in sand moulds have close values of the total performance factor and are to be taken into consideration. Actually, these are the variants deployed at present, as the centrifugal casting installation with three rotation axes is still a novelty, patented and in its pilot phase.

The results of this study show that the manufacturing of hollow balls by three-axis centrifugal casting lends itself to other industrial branches too (e.g. bearing balls manufacturing) where spherical metal elements (balls) are widely used.

Ideas that at first glance appear impossible or useless (e.g. three-axis centrifugal casting) can find unexpected applicability and yield significant economic effects.

References

1. Bobancu, Ș. (2005): *Creativitate și inventică (Creativeness and inventiveness)*. Available at: <http://www.unitbv.ro/Portals/31/Scoala%20Doctorala/Curs%20CI%20-%20Sectiunea%201%20si%202.pdf>, Universitatea Transilvania din Brașov, Romania (in Romanian)
2. Bobancu, Ș. (1998): *Tehnici de creativitate (Techincs of creativeness)*. Editura Lux Libris, ISBN 973-9240-59-3, Brasov, Romania (in Romanian)
3. Ciobanu, I., Țuțuianu, Diana (2008): *Analysis of materials used for the casting of art works*. Metalurgia Internațional, ISSN 1582-2214, no. 12, p. 34-41
4. Cruceru, Ruxandra, Ciobanu, I. (2008): *Comparative analysis of a number of new major tourist objectives achievable in Romania*. Revista de Management și Inginerie Economică, ISSN 1583-624X, vol. 7, no. 3(28), p. 115-127
5. Zubac, V. (1982): *Utilaje pentru turnătorie (Foundry Equipments)*. Editura Didactică și Pedagogică, București, Romania (in Romanian)
6. Jiman, V. (2000): *Cercetări privind turnarea centrifugală a pieselor cu geometrie de rotație în matrițe cu plan de separație (Researchs concerning centrifugal casting of parts with revolution symmetry inside sectional metallic moulds)*. Ph.D. thesis, Transilvania University of Brasov, Romania (in Romanian)

Received in October 2015

Lucrare primită în Octombrie 2015