

ИНОВАТИВНА ТЕХНОЛОГИЯ ЗА ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНА ОБРАБОТКА НА МАТЕРИАЛИ И СПЛАВИ

INOVATIVE TECHNOLOGY FOR HIGH TEMPERATURE PRODUCTION OF MATERIALS AND ALLOYS

Dimitar Karastoyanov, Bogomil Popov

Institute of Information and Communication Technologies, Bulgarian Academy of Science, Sofia, Bulgaria.

e-mail: dkarast@iinf.bas.bg, e-mail: bogomildpopov@gmail.com

Abstract: In the paper is describe a technology for high temperature production (hardening) of materials and alloys with using of Tammann furnace and temperature up to 2300°C. The influence of nano elements on the hardness and wear resistance of the obtained metal or alloy is investigated. The idea for graphitizing of yarns for better hardness against penetrating by materials for protective dress and heat endurance by insulation. For research of the component materials (powders) and size distribution of the particles a laser nano sizer Analysette 22 Nano Tech+ is used. For research of the 3D internal infrastructure a 3D tomograph Nikon XT H 225 is used.

Key words: HIGH TEMPERATURE PROCESSES, TAMMAN FURNACE, NANO ELEMENTS

1. Увод

При производството на детайли от твърди сплави и материали се практикува подобряване на техните качества чрез високотемпературна обработка (спичане) в специални пещи. Области на приложение на високотемпературното нагряване са:

1. Спичане на изделия от композитни твърди сплави волфрамов карбид-кобалт, титано- волфрамов карбид-кобалт, твърди сплави легирани с никел, ниобии-тантал.

2. Спичане на електроконтактни тела: мед-волфрам за високоволтови преносвачи, на нисковолтови контактни пъпки, сребро-кадмиев оксид, сребро- волфрам и др.

3. Във високотемпературната пещ е възможно чрез импрегниране получаването на диамантни сегменти за големи дискове за рязане на скални материали (гранит, мрамор, варовик) и диамантни профилни инструменти.

4. Производство на свръх-твърди материали чрез синтез във високотемпературна пещ. Това са така наричаните металиди, химически съединения като бориди, нитриди, силициди, които притежават висока електропроводимост.

5. Труднотопимите метали волфрам и молибден се използват за различни изделия във високотемпературната техника, атомно-радиационната защита, в космоса и др.

6. Високотемпературната пещ осигурява най-подходящи условия за графитизиране на влакна (за уякчаване на корпусите на МПС, самолети и др.), за получаване на стъклографит (за аеронавтика, специално машиностроене и химическата промишленост).

2. Високотемпературна технология

Внедряването на иновативна технология за производство на високотемпературни материали и сплави, съдържащи наноелементи включва изработването на специализирано съоръжение, основна част на което е високотемпературна Таманова пещ (Tammann Furnace). Тамановата пещ представлява графитна тръба, която се нагрява посредством свързан накъсо силов трансформатор. При трансформатор 30kW – 8V, 3500A може да се постигне температура до 2300°C. В централната част на пещта дебелината на тръбата е намалена, като това води до по-голямо съпротивление на протичащия ток и оттам до по-голямо нагряване.

В тръбата на пещта се пробутват една след друга графитни ладии, в които се поставят детайлите или материалите. Времето на престой във високотемпературната зона и

достигнатата температура на нагряване се изчисляват и се поддържат точно. В противоположна посока се пуска защитен газ (75% водород и 25% азот) против окисляване. Газът се получава чрез каталитично разлагане на амоняк.

В края на пещта има охладител, след който детайлите или материалите се изваждат. Охлаждането е необходимо освен за по лесно боравене с детайлите и материалите, също и за да не се запалят при изваждането им горещи от пещта.

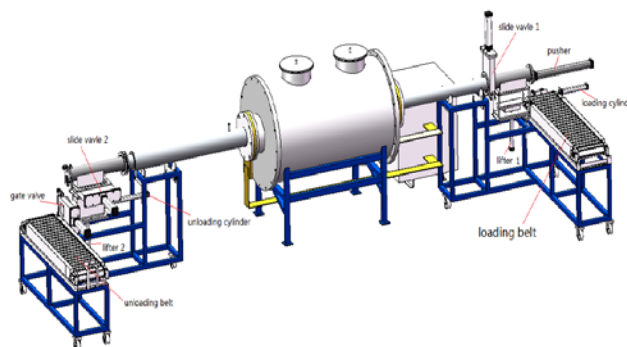
При подходяща автоматика пещта може да работи в непрекъснат режим. За подобряване на режимите и $\cos \phi$ вместо силов трансформатор може да се ползва правотоков генератор на ток.

Температурата в пещта се следи, като до 1700°C това може да става със защитена термодвойка W/WRe или Mo/MoRe. От 1700°C до 2300°C температурата може да се следи и с пирометър.

Захранването на пещта е от токоизправител $U=3\div 8$ V; $I=2000\div 3500$ A. Използването на токоизправител осигурява симетрично натоварване на мрежата.

Работната зона на пещта е защитена от инертна среда на азот и водород, получена чрез дисоциация на амоняк. Дисоциацията на амоняка се осъществява в диасоционен блок с катализатор железни стружки, нагряти до $730\div 750$ °C. Полученият газ съдържащ 75 % H₂ и 25% N₃, се изсушава в сушилна рециклираща се камера при температура $140\div 150$ °C.

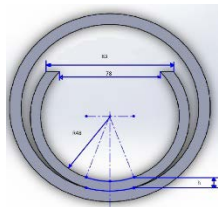
На фиг. 1 е дадена схема на системата за високо температурна обработка на материали и сплави, съдържащи нано елементи. На фиг. 2 е показана графитна ладия, а на фиг. 3–разположението и в тръбата.



Фиг. 1. Обща схема на системата.



Фиг. 2. Графитна ладия



Фиг. 3. Графитна тръба с ладия

3. Температурни изчисления

За оптимизация на енерго потреблението и по технологични причини е извършено пресмятане мощността на високотемпературна електропещ с тръбен графитен нагревател /Таманова пещ/.

За пресмятане на мощността на пещ с работна нагревна тръба с диаметър 152mm. и вътрешен 1840mm. избрахме два представителни процеса:

- Спичане на изделия от титанов карбид
- Карбидизация на титанов оксид до титанов карбид:

И двата процеса се осъществяват при температури над 1800-1900°C. Съществена е разликата, че при карбидизационният процес, който е едотермичен, се поглъща допълнително топлинна енергия. В този случай трябва да се предвиди повишена мощност на съоръжението.

Тамановата пещ е периодична, през съоръжението преминават ладии (контейнери) от графит, в които се насипват шихтата за карбидизация, а в случаите когато се спичат изделия, същите се опаковат с графитни гранули. Независимо от периодичното прогряване на постъпващи ладии в работното пространство на графитната нагревна тръба, изчисленията се провеждат за стационарен режим поради обстоятелството, че по-голямата част от енергията за нагряване е използвана за концентриране във футеровката.

Общата енергия подавана в пещта е $Q_2 = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$

Където :

- Q_1 – топлина акумулирана в изолацията на пещта [J]
- Q_2 – топлина необходима за прогряване на ладии [J]
- Q_3 – топлина за спичане на изделията [J]
- Q_4 – топлинна енергия за карбидизация [J]
- Q_4 – топлинни загуби от нагряване на защитната атмосфера, на графитният конус, стикован с екранната тръба, на водата в тоководещите глави [J].

При изчисленията се приема коефициент отчитащ евентуален запас от топлинна енергия, който за Таманова пещ е 1.2 до 1.4 .

3.1. Определяне енергията необходима за прогряване изолацията (футеровката) на Тамановата пещ.

Методиката за определяне на енергията, необходима за прогряване на екранната тръба, монтирана около работната нагревна тръба, на първия изолационен слой от графитни гранули, както и на керамичната футеровка от вътрешната страна на корпуса на пещта се осъществява съгласно [1]. Използва се методиката на цилиндрична, хоризонтално монтирана пещ каквато е Тамановата пещ.

Дължината 1570 съответства на дължината на екранната тръба, която ограничава нагревната зона в която се осъществяват процеси на карбидизация или спичане.

3.1.1. Определяне енергията предавана от нагревната графитна тръба на екранната тръба чрез излъчване

$E_p = 5.67 \times$ диаметър на екранната тръба \times дължината на екранната тръба

при разлика в температурите на повърхността на двете графитни тръби [1].

$$E_p = 482 \times (3.14 \times 0.17) \times 157 [(2573/100)^4 - (2568/100)^4] = 4.039 \times (4382876 - 434891) = 13722W,$$

Където 5.76 е коеф. на излъчване на абсолютно черно тяло, а 4.82 коеф. на изл. на графитно тяло.

3.1.2. Определяне на енергията за нагряване на отделните слоеве на футеровката.

Използва се зависимостта [1]

$$E_{\phi} = \frac{\pi(T_{\text{вътр.}} - T_{\text{външно}})}{\frac{1}{\alpha_{\text{вътр.}} H_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_1 H_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_2 H_1} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{2\lambda_3 H_1} \ln \frac{d_4}{d_3} + \frac{1}{\alpha_{\text{външ.}} H_2 d_4}}$$

При възможно максимална температура в пещта и температура на нейната повърхност $\sim 50^\circ\text{C}$

$$E_{\phi} = \frac{7065}{0.0375 + 0.002 + 0.018 + 0.0988 + 0.0006 + 0.05765} = \frac{7065}{0.215} = 32860.46W$$

$\lambda_1 = 40.2 \frac{W}{m \cdot ^\circ\text{C}}$ е от [3] стр. 267 за графит със структура + на екстурзията при получаване на граф. тръба.

$\lambda_2 = 23.85 \frac{W}{m \cdot ^\circ\text{C}}$ е от [4] за графитни гранули.

$\lambda_3 = 0.795 \frac{W}{m \cdot ^\circ\text{C}}$ е от [3] стр. 269 и се отнася за силикатен порист огнеупор $50_5O_2 \geq 95\%$

$\lambda_4 = 46.9 \frac{W}{m \cdot ^\circ\text{C}}$ е от [3] стр. 162 и е за стомана 45 (по гост)

В случаите когато цитираният източник е с размерност $\frac{cal}{cm \cdot s \cdot ^\circ\text{C}}$ 10^{-6} превръщането в $\frac{W}{m \cdot ^\circ\text{C}}$ е умножено по 418.68.

Данните за a_1 и a_2 са от [2] .

За проверка на резултатите получени за E_{ϕ} по метода на последователните приближения избрахме следните гранични стойности на температурата на границите на отделни слоеве (методика от източник) [1].

$T_1 = 2300^\circ\text{C}$ - работна температура

$T_2 = 2100^\circ\text{C}$ - температура от лъчение в/у екранната тръба

$T_3 = 2000^\circ\text{C}$ - температура на екранната тръба към графитните гранули

$T_4 = 650^\circ\text{C}$ - температура на границата графитни гранули

$T_5 = 60^\circ\text{C}$ - температура до стената на пещта

$T_6 = 60^\circ\text{C}$ - температура на повърхността на пещта

Проверката на резултата за E_{ϕ} отнесен към температурата на границата на отделните слоеве изолация показва изместване на границата на графитните гранули от 0.850mm към 0.890mm, което означава намаляване на дебелината на огнеупора до 10 cm. За всяка една от повърхностите на футеровката.

Логаритмичните стойности $\ln \frac{0.85}{0.22}$ и $\ln \frac{1.09}{0.85}$ се променят със стойности $\ln \frac{0.85}{0.22} = 1.397$ и $\ln \frac{1.09}{0.85} = 0.203$

Зависимостите $\frac{1}{2 \times 23.85 \times 1.57} \ln \frac{0.85}{0.22} = \frac{1.397}{74.88} = 0.0186$ и

$$\frac{1}{2 \times 0.795 \times 1.57} \ln \frac{0.203}{2.486} = 0.082$$

$$E_{\phi} = \frac{7065}{0.197} = 35862.9W$$

Капаците на пещта от двете и страни също консумират енергия:

Общата им повърхност е $3.14 \times 0.55^2 \times 2 = 1.8997m^2$

При условие че за прогряване на повърхност на пещта от $5.42m^2$ температура $45-50^\circ\text{C}$ се консумира енергията от 35869W, може с достатъчна точност да се определи и мощността разходвана за нагряване до изискуемата се външна повърхност на двата капака:

$$\frac{1.8997}{5.42} \times 35862 = 12569W$$

Общо енергия консумирана за прогряване на пещта е $35869 + 12569 = 48438W$

Определяне на енергията за прогряване на ладии.

Тамановата пещ е съоръжението през което за определено време преминават ладии със шихта или изделия. Времето за нагряване зависи от технологични изисквания: ладии могат да се задържат в максимално нагрята зона на пещта от 10 до 90 минути. При навлизането си в пещното пространство се прогрява от около 473°C до 2273°C , след което преминава в изотермична зона от 2273°C и в края на работната нагревна

трябва се охлажда от струята инертен газ (например водород) например до 1873°C.

Тази разлика в прогряване на графитните ладии се отразява на потреблението на енергия, което може да бъде компенсирано ако приемем че цялата зона от работната част на нагревната тръба е изотермична т.е. нагрятата до 2273°C.

Приетата температура 2273°C съответства на условията при които се получава титанов карбид (~1900°C) и спичане на изделия от металиди (1800 – 1900°C).

Графитните ладии получават енергията за нагряване основно чрез облъчване от работната тоководеща графитна тръба. Частта на ладииите която се плъзга по повърхността на нагревната тоководеща графитна тръба се нагрява директно от нея.

Сегментът от обиколката на графитната ладия, който се трие директно в нагревната тръба се изчислява по формулата

$$L = \sqrt{a^2 + \frac{16}{3}h^2}, \text{ при:}$$

$$A=0.05\text{m}, a=0.005\text{m}, L=0.051\text{m}.$$

Сегментът от обиколката на графитната ладия, през който ще се насипват изделия или шихта е при $a=0.1$, $h=0.28$ и $L=0.125$

Чрез радиация ще се нагрява повърхност $3.14 \times 0.118 - (0.051 + 0.125) = 0.194\text{m}$

Енергията за нагряване на повърхността на графитните ладии, отделена чрез излъчване е следната (за ладииите по дължината на нагревната графитна тръба)

$$E_L = 4.82 \times 0.194 \times 1.57 \left[\left(\frac{2273}{100} \right)^4 - \left(\frac{2223}{100} \right)^4 \right] = 33357 \text{ W}.$$

Енергията за нагряване на повърхността на графитните ладии контактуващи с нагревната тръба е пренебрежимо малко изчислена съгласно [2] $E_K = K \cdot A (2273 - 2223)$ където

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{5}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{100} + \frac{0.008}{4.82} + \frac{1}{10}} = 8.956 \text{ при което}$$

$E_K = 8.956 \times 0.051 \times 1.57 = 35.85 \text{ W}$, резултат отговарящ на факт че графитните ладии контактуват пряко с нагрятата до 2273°C нагревна графитна тръба

3.1.3. Определяне необходимата енергия за синтез на титанов карбид

Синтез на титанов карбид се извършва съгласно уравнението $\text{TiO}_2 + 3 \text{C} = \text{TiC} + 2\text{CO}$ с поглъщане на $44600 \frac{\text{cal}}{\text{mol}}$ енергия т.е. процесът е ендотермичен.

Погълнатата за осъществяване на процеса допълнително енергията зависи от температурата при която се провежда [5].

$$Q_{\text{TiC}} = (-44600 + 3.16 \times T^\circ)$$

Молната маса на титановия карбид е $(47.88 + 12.11) = 59.99$ или $-\frac{44600 + 3.16 \times 2273}{59.99} = -623 \frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{K}}$ или $-2611 \frac{\text{W}}{\text{g}^\circ\text{K}}$

Синтезът се осъществява с титанов диоксид = модификация анатаз за да се избегне допълнително разход на енергия при използване на рутил, който при около 650°C се превръща с поглъщане на топлина в анатаз [6].

Плътността на анатаза е 3.84 g/cm^3 . Използва се като редуктор и карбидообразуещ материал активни сажди със специфична повърхност до 100nm, получени чрез термично разлагане на тежки нефтопродукти. Нефто продуктите от вид са с много малка насипна плътност. Това означава че минималното количество сажди ще запълнят ладииката. За да се осъществи реален добив на титанов карбид шихтата от анатаз и сажди се хомогенизира, брикетира чрез пресоване, брикетите се разрушават до гранули с размери 5-6mm. Насипната плътност на гранулите е 1.0 до 1.15 g/cm^3 .

В една ладия с обем $(3.14 \times 48^2 \times 33) - 0.194(3.14 \times 48^2 \times 33) = 19234.3 \text{ cm}^3$ може да се насипе до 1.9 до 2,2 kg гранули.

Енергията която трябва допълнително да се предаде в реакционната смес за да се компенсира ендотермичния процес при карбидизацията е:

$2611 \times 1950 = 5091.450 \text{ W}$ (5.09kW) или за общо 4.36 ладии ще бъде 22198.722 (22.22kW).

При открита площ на ладииите $(0.078 \times 0.322) \times 4.36 \approx 0.113 \text{ cm}^3$.

През тази площ гранулите ще се нагряват директно чрез излъчване или

$$E_{\text{изл}}^{\text{гр}} = 4.82 \times 0.113 \left[\left(\frac{2273}{100} \right)^4 - \left(\frac{2173}{100} \right)^4 \right] = 0.541 \times [266930 - 222966] = 23784 \text{ W} (\sim 24 \text{ kW}).$$

Лъчистата енергия която ще нагрява графитните ладии ще бъде по-голяма поради температурната разлика осигуряващ процеса на карбидизацията.

$$E_{\text{изл}}^{\text{л}} = 4.82 \times 0.194 \left[\left(\frac{2273}{100} \right)^4 - \left(\frac{2173}{100} \right)^4 \right] = 0.935 \times [266930 - 222966] = 41106.$$

Енергията използвана за нагряване на ладииите със шихта за карбидизация общо при нагряване от източник с температура 2273°C е $23784 + 41106 = 64890$, но около една трета от нея компенсира, ендотермичната енергия погълната от шихтата $64890 - 22198 = 42692 \text{ W}$.

3.1.4. Енергията необходима за спичане изделия от титанов карбид.

Прахово металургичните изделия от титанов карбид се спичат в зависимост от тяхната форма и обем при температури от 1800 до 1900°C изделията са с различна форма обуславяща и различна повърхност. За не се получат изкривявания или други нежелани деформации изделията се опаковат при поставяне в ладииите. Около тях и над се насипват графитови гранули с едрина 5-6mm. Спичането се осъществява чрез пренасяне на топлина от стените на графитната ладия или директно от гранулите в отворената част на ладииите. Поради различната форма на изделията изчисляването на необходимата енергия за спичането им се затруднява. За това приемаме че като образец спичаме плочки с размери $73 \times 35 \times 320 \text{ mm}$.

Спичането се осъществява чрез топлопредаване през графитовите гранули. По данни от [5] термичният коефициент на титановия карбид е $9.26 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$.

Общата повърхност на изделията в ладииите е 0.301 m^2 (повърхността на едната плочка е 0.006 m^2). Дебелината на прослойките от графитни гранули е съответно 3.25 и 2.5 mm. (3mm за долната страна, 2.5 за граничните слоеве и 2.5 към отвора на ладията). Приемаме че средната дебелина е 2.7mm. Това означава че има малка консумация на енергия за прогряване. За нагряване повърхността на графитовите ладии до 1950°C е консумирана енергия 333577 W . Енергия която ще е необходима за спичане на плочките от титанов карбид при условие че спадът на температурата в графитовите гранули е 20°C т.е. изделията ще се уплътняват при 1930°C е следната:

$$E_{\text{TiC}} = 9.26 \times 0.301 \left[\left(\frac{2243}{100} \right)^4 - \left(\frac{2203}{100} \right)^4 \right] \approx 48992 \text{ W т.е. } 48 \text{ kW}$$

Стойностите на енергията необходима за получаването на титанов карбид респективно за спичане на изделия синтезиращ материал са близки по стойност около 42,5 kW за синтез, отнесен към 49kW за спичане. По ниската консумация на енергия при синтеза е за сметка ендотермичния процес при синтеза. При изчисляване на общата мощност необходима за осъществяване на процесите в пещта трябва да се вземе предвид тази при процеса на карбидизация.

Общата енергия изразходвана за прогряване на пещта и осъществяване на карбидизационен процес с около 91 kW. При спичане на изделията изчислената енергия е около 49 kW. Като се има на предвид че при карбидизацията се извършва допълнителен разход на енергия получената стойност от 42692 W е меродавна. При сумиране на консумираната енергия. Разходът на енергия при карбидизация се попълва от продължително прогряване (обикновено до 60 минути за цикъл

от една ладия, което е с около 25% повече в сравнение времето за спичане на изделия от титанов карбид.

Следователно мощността на топлоизточника за прогряване на пещта и осъществяване на процес на карбидизация е $(48992 + 42692)W = 91684W$

При изчисляване на загубите от енергия не сме взели предвид разхода за прогряване на защитната атмосфера и загубите от прогряване на водата за охлаждане на тоководещите глави. Този разход е пренебрежимо малък тъй като разхода на флуиди са отнесени за секунда ($W = \frac{cal}{s}$). Приема се коефициент на запас при изчисляването на мощността на пещта 1.15-1.2, следователно монтираната мощност е не повече от 100kW. Разходът на енергия за прогряване на използваните флуиди ще се компенсира от коеф. на запас на монтираната мощност.

4. Изследвания на материалите

За изследване на материалите и резултатите от високо температурната обработка ползвахме следните уреди:

Лазерен нано грануломер Fritsch Analysette 22 NanoTec plus – фиг. 4

Анализаторът съдържа измервателен модул, диспергиращ модул за „мокро“ измерване с диапазон 0.01 – 2000 микрона, диспергиращ модул за „сухо“ измерване с диапазон 0.1 – 2000 микрона, полупроводникови лазери с живот средно 10000 часа.



Фиг. 4. Измервателни модули на нано грануломера

Компютърен томограф Nikon XT H 225 – фиг. 5,

Предназначен е за изследване на широк обхват от материали и размери. Разделителната способност на детектора е 1900x1500 с активна площ 467 cm², петното на Х-лъча е под 3 μm. Дава 3D реконструкция на вътрешната структура на изследвания обект.

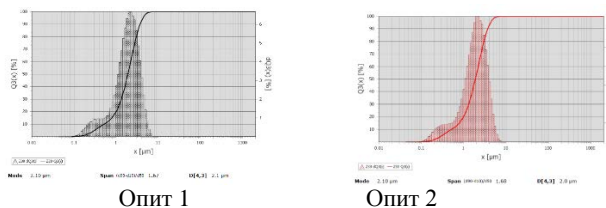


Фиг. 5. 3D рентгенов томограф.

Бяха извършени изследвания на прахообразни материали, предназначени за високотемпературна обработка (Титанов двуборид) и на детайли (плочка), получени от материали (Борен карбид В₄С) чрез горещо пресоване в графитни пресформи.

Бяха получени следните резултати:

ЗА ПРАХОВЕТЕ (изследване с лазерен нано грануломер - фиг. 6:



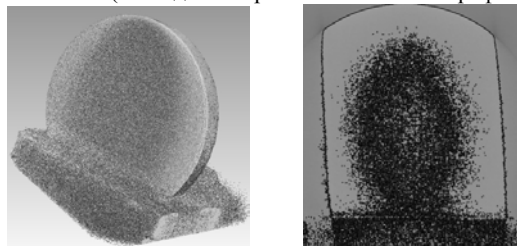
Фиг. 6. Разпределение на частиците по едрина

Резултати и изводи за големината на частиците:

Титановият двуборид е получен чрез саморазпространяващ се процес, като са използвани чисти компоненти: прахове от

титан и бор. Способът е много скъп и ниско ефективен. Получават се малки количества в калометрични бомби. Експериментът е проведен като сравнителен метод с възможностите при използване на високотемпературна Таманова пещ.

ЗА ПЛОЧКАТА (изследване с рентгенов 3D томограф - фиг. 7:



Структура на повърхността Вътрешна 3D структура
Фиг. 7. Структура на детайла (плочката)

Резултати и изводи за компакният детайл от борен карбид В₄С.

За сравнение с възможностите на тамановата пещ са изработени чрез горещо пресоване в графитни пресформи изделия от борен карбид. Горещото пресоване е еднократен процес при 2000 °С и налягане до 300kg/cm². При спичането използваните графитни пресформи се саморазрушават. Ро дефектоскопия показва че методът на горещо пресоване на високотемпературни материали, на какъвто е борният карбид (В₄С) не позволява получаване на плътни изделия. Този недостатък се избягва при високотемпературно спичане в таманова пещ при 2000-2050°С.

5. Заключение

Високотемпературните процеси са специален случай на обработка на материали и сплави, при които могат да се получат висока твърдост и износостойчивост на получените или закалени детайли, с широко приложение в различни индустриални области.

Благодарности.

Изследването в настоящата работа е осъществено благодарение на закупена техника от проект AComIn "Advanced Computing for Innovation", договор 316087, финансиран от „Капацитети“ в 7-ма Рамкова програма на Европейската комисия (ЕК), "Научно-изследователски потенциал в конвергентните райони" и с финансовата подкрепа на договор Д01-192.

6. Литература:

1. Богданов. С.П, Расчет печей сопротивления, Методические указания, Санпетербург. 2006г.
2. KANTAL SUPER HANDBOOK, допълнение 2 стр.160
3. Таблици физических велечин Справочник, Атомиздат, Москва.
4. По каталог на фирма <http://www.alibaba.com>
5. Самсонов Г.В. , И.М. Виночкии, Тугоплавкие соединения , Металургие Москва 1976г. стр.150
6. Самсонов Г.В. и други , Физикохимические свойства окислав, Металурге , Москва 1969 г. стр.40
7. Проспект на Promat-Белгия и RATH-Франция за топлоизолиращи вати, които имат постоянен коефициент на топлоизолация, които не зависи от температурата.
8. Tamman Furnace – RUHSTRAT GMBH, Manual and Application, Berlin, 2012
9. D. Karastoyanov, D. Ivanova, N. Stoimenov., Technology for Production of High Temperature Materials and Alloys Including nano Elements., 19th International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computer, CCCC'15, 15.07.2015 – 21.07.2015, Zakynthos Island, Greece, ISSN 1790-5117, ISBN 978-1-61804-321-4, pp 177-181