

Osobine izolacionih i vatrostalnih opeka

Prema trenutno važećem standardu SRPS EN1094-2:2009 za klasifikaciju izolacionih vatrostalnih oblikovanih proizvoda, oznaka opeka za ovu namenu se sastoji iz tri dela: grupe kojoj pripada, indikacije o gustini i eventualnoj pripadnosti klasi L. Grupa je numerički broj koji predstavlja 10% temperature na kojoj je izvršeno ispitivanje opeke i pri kojoj ne sme doći do trajne promene dimenzija opeke veće od 2%.

Tabela 1: Klasifikacija opeka prema SRPS EN1094-2:2009

Grupa	Temperatura ispitivanja, °C	Gornja granica gustine kako bi opeka pripadala klasi L, g/cm ³
75	750	0,40
80	800	0,50
85	850	0,55
90	900	0,60
95	950	0,65
100	1.000	0,65
105	1.050	0,65
110	1.100	0,70
115	1.150	0,70
120	1.200	0,70
125	1.250	0,75
130	1.300	0,80
135	1.400	0,85
140	1.350	0,90
150	1.500	0,95
160	1.600	1,15
170	1.700	1,35
180	1.800	1,60

Vatrostalne opeke za ozid peći za termičku obradu metala se obično izrađuju od alumino-silikatnih materijala, odnosno od šamota. Iako većina proizvođača nudi veliki broj oblika i dimenzija opeke, standardna opeka je pravougaona sa dimenzijama 230 mm × 114 mm × 64 mm.

Tabela 2: Alumino-silikatne šamotne opeke proizvođača NOVA Refractories

Opeka	SRPS EN 1094	Poro-znost, %	Pritisna čvrstoća MPa	Koef. topl. provodljivosti, W/m°C	Sastav %Al ₂ O ₃ /%SiO ₂ / Fe ₂ O ₃
NOVASIL A-0	140-2,11	21	25	1,131+0,000172×T	40/56/1,8
NOVASIL A-I	135-2,06	21	24	1,131+0,000172×T	38/59/2,1
NOVASIL CM-0	140-2,16	18	35	1,121+0,000212×T	42/54/1,5
NOVASIL CM-I	140-2,13	20	34	1,121+0,000212×T	40/55/1,7
NOVASIL CM-Z	135-2,19	18	40	1,121+0,000212×T	33/62/2,2

U slučajevima kada su radne temperature klasičnih šamotnih opeka nedovoljno visoke (što je kod peći za termičku obradu metala veoma redak slučaj), neophodno je koristiti opeke sa povišenim sadržajem aluminijum-oksida, odnosno neophodno je koristiti visokoaluminozne opeke.

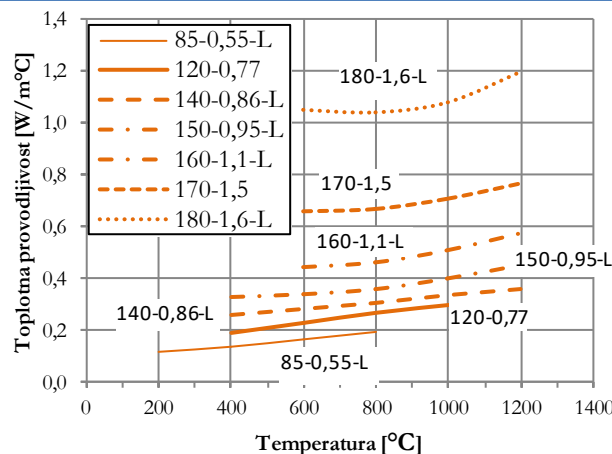
Tabela 3: Visokoaluminozne vatrostalne opeke proizvođača NOVA Refractories

Opeka	SRPS EN 1094	Poro-znost, %	Pritis na čvrstoća MPa	Koef. topl. provodljivosti, W/m°C	Sastav %Al ₂ O ₃ /%SiO ₂ /Fe ₂ O ₃
NOVAL CM-HV	140-2,20	19	40	1,156+0,000182·T	40/55/1,8
NOVAL VA-50	150-2,37	19	50	1,320+0,000290·T	50/45/1,5
NOVAL VA-60	150-2,50	19	50	1,320+0,000290·T	60/36/1,6
NOVAL VA-70	160-2,63	17	60	1,930+0,000209·T	70/25/1,5
NOVAL VA-80	160-2,79	18	65	1,992+0,000284·T	80/13/1,4
NOVAL 90K	170-2,90	17	75	2,637+0,000145·T	90/6/0,4

Pored klasičnih vatrostalnih opeka, u novije vreme se sve češće koriste izolacione opeke. One se takođe prave od vatrostalnih materijala, ali na takav način da se dobije veoma porozna struktura. Time se smanjuje njihova gustina, a sa njom posledično i toplotna provodljivost. Nažalost, ovakva tehnologija izrade dovodi i do određenih nedostataka, a to je pad mehaničkih osobina.

Tabela 4: Izolacione vatrostalne opeke proizvođača NOVA Refractories

Opeka	SRPS EN 1094	Poro-znost, %	Pritisna čvrstoća MPa	Koef. topl. provodljivosti, W/m°C	Sastav %Al ₂ O ₃ /%SiO ₂ /Fe ₂ O ₃
NOVASIL L-100	110-1,03	59	3	0,258+0,000225·T	20/73/1,5
NOVASIL L-125	125-1,25	54	6,5	0,330+0,000250·T	21/71/1,5
NOVASIL L-130	130-1,31	50	6,7	0,350+0,000250·T	21/71/1,5
NOVASIL L-155	150-1,23	54	5	0,291+0,000138·T	59/37/0,8
NOVASIL L-170	170-1,31-L	52	4,5	0,525+0,000125·T	76/19/0,8



Iako većina proizvođača meri koeficijent toplotne provodljivosti svojih proizvoda i daje ga u katalogu, to nije slučaj i sa specifičnim toplotnim kapacitetom. Razlog za ovo je veoma jednostavan. U stacionarnom režimu provođenja toplote (koji se uglavnom i koristi) on nema nikakav uticaj na toplotne gubitke. Za potrebe nestacionarnih proračuna korišćićemo sledeću metodologiju. U tabeli 5 su date molarne mase i molarni toplotni kapaciteti keramičkih jedinjenja koja se nalaze u izolacionim i vatrostalnim opekama. Specifični toplotni kapacitet konačne opeke se može izračunati sabiranjem specifičnih toplotnih kapaciteta sastavnih jedinjenja i njihovim ponderisanjem udelom datog jedinjenja u ukupnoj smeši.

$$c_p(T) = \%Al_2O_3 \cdot c_{p Al_2O_3}(T) + \%SiO_2 \cdot c_{p SiO_2}(T) + \dots \quad (1)$$

Tabela 5: Molarna masa i molarni toplotni kapacitet keramičkih jedinjenja od kojih se prave izolacione i vatrostalne opeke [J/mol×°C]

Jedinjenje	Molarna masa, M [g/mol]	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
Al_2O_3	101,9613	102,429	38,7498	-15,9109	2,628181	-3,007551
SiO_2	60,0843	-6,076591	251,6755	-324,7964	168,5604	0,002548
Fe_2O_3	159,6880	93,43834	108,3577	-50,86447	25,58683	-1,611330
MgO	40,3044	47,25995	5,681621	-0,872665	0,104300	-1,053955
CaO	56,0770	62,76	$4,629681 \times 10^{-7}$	$-1,092037 \times 10^{-7}$	$8,966312 \times 10^{-9}$	$6,504656 \times 10^{-7}$
$C_M = a_0 + a_1 \times a_5 + a_2 \times a_5^2 + a_3 \times a_5^3 + a_4 / a_5^2$, gde je $a_5 = (T + 273,15) / 1000$						

Osobine vunenih izolacionih proizvoda

Kako bi se maksimalno snizili toplotni gubici peći za termičku obradu, u novije vreme se

Keramičke vune za visokotemperaturnu termoizolaciju (staklena i kamena vuna se ne mogu koristiti za temperature iznad 600°C, a dominantno područje primene im je ispod 300°C) se proizvode od tri osnovna tipa vlakana:

- Aluminosilikatna vuna (vatrostalna keramička vlakna, ASW) se proizvodi od amorfnih vlakana od aluminijum i silicijum oksida u približno jednakom težinskom odnosu. U slučaju da temperatura primene i hemijski sastav atmosfere to zahtevaju, ponekad se dodaje i određen procenat cirkonijum oksida. Dominantno područje primene ovih vuna je oko 1.200°C, a u zavisnosti od atmosfere i ostalih uslova primena joj se obično kreće od 700°C do 1.400°C. U odnosu na ostale dve klase keramičkih vuna, imaju nešto bolju izdržljivost na povišene brzine gasova.
- Alkalno-zemnoalkalna silikatna vuna (AES) Ovo je nova klasa materijala razvijana nakon što je Evropska Unija direktivom 67/548/EEC klasifikovala aluminosilikatna vatrostalna keramička vlakna kao kancerogen druge kategorije. Pored amorfno SiO_2 , ova vuna obično sadrži CaO i MgO koji omogućavaju ovoj vrsti vlakana povećanu bioapsorbiciju u ljudskom organizmu te se vune sa visokim sadržajem zemnoalkalnih oksida ne smatraju kancerogenim. Sa stanovišta zdravlja na radu, zanimljivo bi bilo primetiti nemačku TRGS 905 direktivu koja definiše kancerogenost keramičkih vlakana uvođenjem KI indeksa.

$$KI = \%Na_2O + \%K_2O + \%CaO + \%MgO + \%BaO + \%B_2O_2 - 2 \cdot \%Al_2O_3 \quad (2)$$

Vlakna sa KI vrednosti $\geq 40\%$ se klasifikuju kao bezbedna, za $KI=30\% - 40\%$ vlakna se definišu kao vlakna sa mogućim kancerogenim efektom, dok vlakna sa $KI \leq 30\%$ treba tretirati kao kancerogena za ljude. Dominantno područje primene ovih vuna je oko 800°C, a u zavisnosti od atmosfere i ostalih uslova primena joj se obično kreće od 500°C do 1200°C. Ovaj tip vune treba izbegavati u vlažnim atmosferama i gde je moguća kondenzacija atmosferske vlage. Pri tome, prekidni rad nepovoljno utiče na osobine ove vune, naročito u gasnim korozijskim atmosferama. Na primer, maksimalna radna temperatura AES ćebeta Superwool Pro prema tabeli 7 iznosi 1000°C. Međutim, u prisustvu oksida bora i fosfora hemijske reakcije i degradacija osobina ovih ćebadi se odigravaju već na 700°C.

- Polikristalna vuna (PCW) se sastoji od vlakana sa sadržajem aluminijum oksida većim od 63%. Za razliku od prethodne dve klase vuna, vlakna se u startu nalaze u kristalnom stanju te ne dolazi do faznih promena na povišenim temperaturama. Ova klasa materijala se odlikuje i velikom hemijskom inertnošću što je čini pogodnim izborom za sve vrste atmosfera. Obično se koriste kada nijedna od prethodne dve klase vuna ne ispunjava zahteve bilo u pogledu temperature ili okolne atmosfere. Temperaturno područje primene im je do 1700°C.

Termičke osobine vunenih izolacionih ćebadi jednog od najrenomiranijih svetskih proizvođača date su u tabeli 7. Ćebad se proizvode u širini od 610 mm i debljinama od 6 mm, 10 mm, 13 mm, 19 mm, 25 mm, 38 mm i 50 mm (sve dimenzije nisu dostupne za svaku gustinu i vrstu ćebeta).

Tabela 6: Tipičan sastav određene klase vlakana prema SRPS EN 1094-1:2009

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	TiO ₂	CaO+MgO	Ostali oksidi
AES	50 - 82	Z b i r n o < 6			18 - 43	< 1
ASW	46-56	44-54	-	-	-	< 1
ASW+Zr	> 48	< 37	< 20	-	-	< 1
PCW	3 - 28	72-97	-	-	-	< 0,1

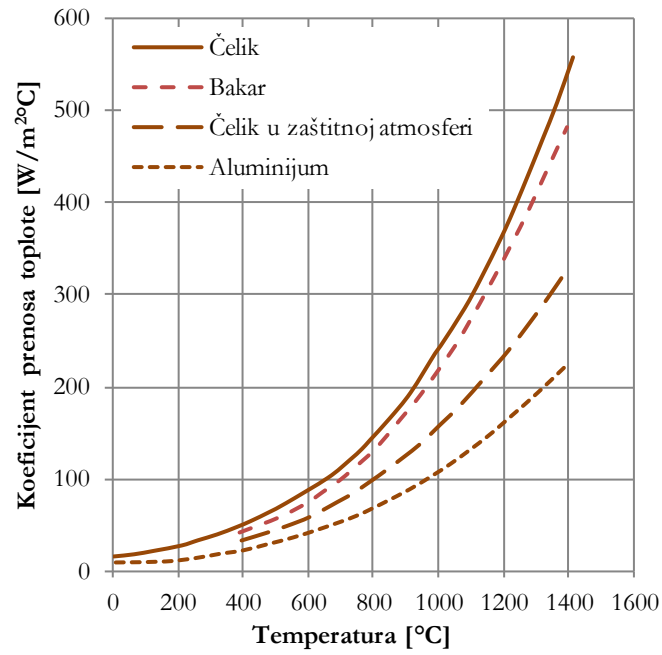
Tabela 7: Osobine vunениh izolacionih čebadi proizvođača Morgan Advanced Materials

	T _{ispitivanja} / T _{maks.} radna [°C]	Spec. topl. kapacitet [J/kg°C]	Koef. topl. provodljivosti [W/m°C]	Napomena
Kaowool S 64 kg/m ³			$4,4 \times 10^{-2} + 6,43 \times 10^{-5} \cdot T + 3,21 \times 10^{-7} \cdot T^2$	
Kaowool S 96 kg/m ³	1260 / 1093	1130	$3,4 \times 10^{-2} + 1,06 \times 10^{-4} \cdot T + 1,79 \times 10^{-7} \cdot T^2$	ASW
Kaowool S 128 kg/m ³			$3 \times 10^{-2} + 1,31 \times 10^{-4} \cdot T + 1,07 \times 10^{-7} \cdot T^2$	
Cerachem 128 kg/m ³	1425 / 1315	1130	$2,9 \times 10^{-2} + 1,36 \times 10^{-4} \cdot T + 1,03 \times 10^{-7} \cdot T^2$	ASW+Zr
Superwool 64 kg/m ³	Plus: 1200 / 1000		$4,2 \times 10^{-2} + 2,14 \times 10^{-5} \cdot T + 3,57 \times 10^{-7} \cdot T^2$	AES HT verzija ove vune ima viši sadržaj SiO ₂ te je rizik od karcinoma viši, ali zadržava svojstva na višim temperaturama.
Superwool 96 kg/m ³		1140	$2,6 \times 10^{-2} + 8,57 \times 10^{-5} \cdot T + 1,79 \times 10^{-7} \cdot T^2$	
Superwool 128 kg/m ³	HT: 1300 / 1150		$3,6 \times 10^{-2} + 3,57 \times 10^{-5} \cdot T + 1,79 \times 10^{-7} \cdot T^2$	
MAFTEC 96 kg/m ³	1600 / 1600	1200	$0,12 - 2,32 \times 10^{-4} \cdot T + 3,93 \times 10^{-7} \cdot T^2$	PCW
MAFTEC 128 kg/m ³			$0,102 - 1,68 \times 10^{-4} \cdot T + 3,08 \times 10^{-7} \cdot T^2$	

Približne vrednosti koeficijenta prenosa toplote

Tabela 8: Koeficijent prenosa toplote sa plašta peći na okolinu u W/m²°C

Temperatura plašta [°C]	Opeka ili običan obojeni metal		Metal obojen vatrostalnom aluminijumskom bojom	
	T _{ok} =0°C	T _{ok} =20°C	T _{ok} =0°C	T _{ok} =20°C
40	11,2	10,5	9,1	8,3
60	12,3	12,1	10,0	9,6
80	13,5	13,4	10,9	10,6
100	14,4	14,5	11,6	11,5
120	15,5	15,6	12,3	12,3
150	17,2	17,4	13,6	13,6
200	19,9	20,2	15,5	15,6
250	23,0	23,5	17,4	17,7
300	26,5	27,1	19,5	19,8
350	30,2	30,9	21,9	22,2
400	34,3	35,1	24,3	24,7
500	44,4	45,4	30,2	30,6



Slika 1: Približne vrednosti srednjeg koeficijenta prenosa toplote sa peći na radni komad pri zagrevanju sa 0°C

Hajsler-Greber dijagrami za nestacionarni proces provođenja toplote i odgovarajuće tabele

Tabela 9: Koeficijenti korišćeni u aproksimaciji prvog reda nestacionarnog jednodimenzionalnog provođenja toplote

Bi	Ravan zid		Cilindar		Sfera	
	a_1	a_2	a_1	a_2	a_1	a_2
0,01	0,0998	1,0017	0,1412	1,0025	0,1730	1,0030
0,02	0,1410	1,0033	0,1995	1,0050	0,2445	1,0060
0,04	0,1987	1,0066	0,2814	1,0099	0,3450	1,0120
0,06	0,2425	1,0098	0,3438	1,0148	0,4217	1,0179
0,08	0,2791	1,0130	0,3960	1,0197	0,4860	1,0239
0,10	0,3111	1,0161	0,4417	1,0246	0,5423	1,0298
0,20	0,4328	1,0311	0,6170	1,0483	0,7593	1,0592
0,30	0,5218	1,0450	0,7465	1,0712	0,9208	1,0880
0,40	0,5932	1,0580	0,8516	1,0931	1,0528	1,1164
0,50	0,6533	1,0701	0,9408	1,1143	1,1656	1,1441
0,60	0,7051	1,0814	1,0184	1,1345	1,2644	1,1713
0,70	0,7506	1,0918	1,0873	1,1539	1,3525	1,1978
0,80	0,7910	1,1016	1,1490	1,1724	1,4320	1,2236
0,90	0,8274	1,1107	1,2048	1,1902	1,5044	1,2488
1,00	0,8603	1,1191	1,2558	1,2071	1,5708	1,2732
2,00	1,0769	1,1785	1,5995	1,3384	2,0288	1,4793
3,00	1,1925	1,2102	1,7887	1,4191	2,2889	1,6227
4,00	1,2646	1,2287	1,9081	1,4698	2,4556	1,7202
5,00	1,3138	1,2403	1,9898	1,5029	2,5704	1,7870
6,00	1,3496	1,2479	2,0490	1,5253	2,6537	1,8338
7,00	1,3766	1,2532	2,0937	1,5411	2,7165	1,8673
8,00	1,3978	1,2570	2,1286	1,5526	2,7654	1,8920
9,00	1,4149	1,2598	2,1566	1,5611	2,8044	1,9106
10,00	1,4289	1,2620	2,1795	1,5677	2,8363	1,9249
20,00	1,4961	1,2699	2,2880	1,5919	2,9857	1,9781
30,00	1,5202	1,2717	2,3261	1,5973	3,0372	1,9898
40,00	1,5325	1,2723	2,3455	1,5993	3,0632	1,9942
50,00	1,5400	1,2727	2,3572	1,6002	3,0788	1,9962
100,00	1,5552	1,2731	2,3809	1,6015	3,1102	1,9990
∞	1,5708	1,2732	2,4048	1,6021	3,1416	2,0000

Tabela 10: Rešenja nultog i prvog reda Beselove funkcije prve vrste.

$a_3 = (a_1 x^*)$	$J_0(a_3)$	$J_1(a_3)$
0,0	1,0000	0,0000
0,1	0,9975	0,0499
0,2	0,9900	0,0995
0,3	0,9776	0,1483
0,4	0,9604	0,1960
0,5	0,9385	0,2423
0,6	0,9120	0,2867
0,7	0,8812	0,3290
0,8	0,8463	0,3688
0,9	0,8075	0,4059
1,0	0,7652	0,4400
1,1	0,7196	0,4709
1,2	0,6711	0,4983
1,3	0,6201	0,5220
1,4	0,5669	0,5419
1,5	0,5118	0,5579
1,6	0,4554	0,5699
1,7	0,3980	0,5778
1,8	0,3400	0,5815
1,9	0,2818	0,5812
2,0	0,2239	0,5767
2,1	0,1666	0,5683
2,2	0,1104	0,5560
2,3	0,0555	0,5399
2,4	0,0025	0,5202
2,6	-0,0968	-0,4708
2,8	-0,185	-0,4097
3,0	-0,2601	-0,3391
3,2	-0,3202	-0,2613

Korelacije za proračun osobina vazduha

Osobine suvog vazduha na povišenoj temperaturi se mogu izračunati na osnovu sledeće polinomalne regresione jednačine:

$$Osobina(T) = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3 + a_4T^4 + a_5T^5 \tag{3}$$

Polinomalni koeficijenti za izabrane fizičke osobine su dati u tabeli 11.

Tabela 11: Koeficijenti za proračun osobina vazduha.

Koef.	Dinamička viskoznost μ [kg/m s]	Specifični toplotni kapacitet pri konst. pritisku [J/kg°C]	Specifični toplotni kapacitet pri konst. zapremini [J/kg°C]	Koeficijent toplotne provodljivosti [W/m°C]	Prandtlv broj
a_0	1,71520956786 $\times 10^{-5}$	1,00320291236 $\times 10^3$	7,16102912357 $\times 10^2$	-2,95968534382	7,13265720322 $\times 10^{-1}$
a_1	4,90133454253 $\times 10^{-8}$	1,24289173560 $\times 10^{-2}$	1,24289173560 $\times 10^{-2}$	5,58806452684 $\times 10^{-2}$	-2,81353915542 $\times 10^{-4}$
a_2	-3,57222599208 $\times 10^{-11}$	6,29698338507 $\times 10^{-4}$	6,29698338507 $\times 10^{-4}$	-9,32139642241 $\times 10^{-5}$	7,88267813359 $\times 10^{-7}$
a_3	2,78834331490 $\times 10^{-14}$	-7,70498092045 $\times 10^{-7}$	-7,70498092045 $\times 10^{-7}$	3,24034470314 $\times 10^{-9}$	-8,40882376487 $\times 10^{-10}$
a_4	-1,29005211506 $\times 10^{-17}$	3,78984981413 $\times 10^{-10}$	3,78984981413 $\times 10^{-10}$	6,01722787836 $\times 10^{-11}$	4,12128359381 $\times 10^{-13}$
a_5	2,46182579254 $\times 10^{-21}$	-6,87187535260 $\times 10^{-14}$	-6,87187535260 $\times 10^{-14}$	-2,43854686403 $\times 10^{-14}$	-7,70778706484 $\times 10^{-17}$