

## ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

Тепловий баланс складають на основі матеріального балансу технологічного процесу, здійснюваного в плавильному агрегаті, для встановлення витрати енергії на процес у цілому або на окремі його елементи. При проектуванні печей статті теплового балансу знаходять за розрахунком. Для аналізу теплової роботи діючих печей статті балансу визначають як експериментально, так і в результаті розрахунку.

Тепловий баланс складають на одиницю вихідних матеріалів, одиницю часу або на період роботи. Для печей періодичної дії теплові баланси складають щодо одного робочого циклу (наприклад, для одного плавлення), для печей безперервної дії – на одиницю часу. Часто зручніше відносити теплові баланси до одиниці маси матеріалу – шихти або кінцевого продукту.

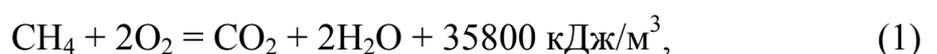
Теплові баланси можуть бути складені для робочого простору печі або його частини, для печі в цілому. Крім того, складають теплові баланси окремих елементів плавильного агрегата, наприклад, рекуператора для підігрівання повітря, казана-утилізатора та ін. Для складання теплового балансу мають бути відомі конструкція печі, її розміри та властивості матеріалів, використаних для її виготовлення, матеріальний баланс матеріалів, що переробляються, вид теплоносія, спосіб теплопередачі та інші теплотехнічні умови роботи печі.

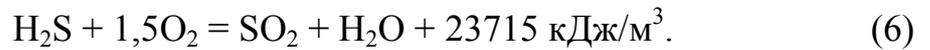
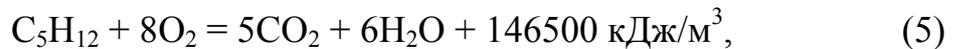
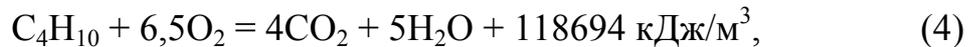
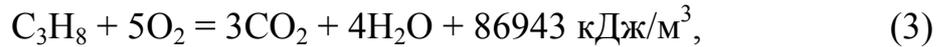
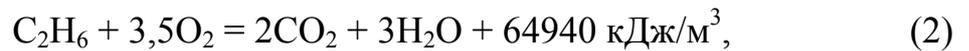
Тепловий баланс являє собою рівняння, що пов'язує на основі закону збереження енергії надходження та витрачання теплоти в плавильному агрегаті.

*Розрахунок горіння палива* виконують для визначення кількості повітря, теоретично необхідного для спалювання палива, дійсної кількості повітря, кількості й складу продуктів згоряння та нижчої теплоти згоряння палива.

Практичну витрату повітря на згоряння палива розраховують на підставі кількості повітря, теоретично необхідного для спалювання палива, з урахуванням коефіцієнта надлишку повітря. Значення коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha$  залежить від типу палива, конструкції паливоспалювальних пристроїв та умов їх експлуатації.

Кількість повітря, теоретично необхідну для спалювання палива, визначають як суму кількості повітря на горіння кожного елемента палива. Горіння елементів палива відбувається за реакціями:





Нижчу теплоту згоряння природного газу визначають за формулою:

$$Q_n^p = \sum_{i=1}^n q_i \cdot c_i, \quad (7)$$

де  $q_i$  – тепловий ефект реакції горіння  $i$ -го елемента палива, кДж/м<sup>3</sup>;

$c_i$  – вміст  $i$ -го елемента у складі палива, частка;

$n$  – кількість елементів у складі палива.

Складові природного газу CO<sub>2</sub> та N<sub>2</sub> переходять у димові газу.

Методики складання матеріального балансу горіння палива та теплового балансу плавлення вторинної алюмінієвої сировини подано у прикладі 1 та прикладі 2 відповідно.

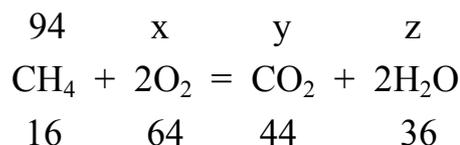
**Приклад 1.** Визначити витрату повітря, кількість та склад продуктів згоряння палива, нижчу теплоту згоряння палива при спалюванні в короткобарабанній печі природного газу (склад, %: 94,0 CH<sub>4</sub>; 3,0 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>; 0,8 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>; 0,2 C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>; 0,1 C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>; 0,9 CO<sub>2</sub>; 1,0 N<sub>2</sub>). Розрахунок провести при  $\alpha=1,0$  та  $\alpha=1,1$ . Прийняти, що газ сухий (0 % H<sub>2</sub>O), при розрахунках речовини реагують у стехіометричних відношеннях.

#### Розв'язання

Розрахунок проводимо на 100 м<sup>3</sup> сухого газу.

Складові природного газу CO<sub>2</sub> та N<sub>2</sub> переходять у димові газу.

Для перебігу реакції (1)



потрібно  $x=376,00 \text{ м}^3 \text{ O}_2$  і утворюється  $y=258,50 \text{ м}^3 \text{ CO}_2$ ,  $z=211,50 \text{ м}^3 \text{ H}_2\text{O}$ .

Аналогічно розраховуємо витрату кисню для спалювання решти компонентів газу і результати записуємо в табл. 1.

У результаті розрахунку дістанемо:

– при  $\alpha=1,0$  потрібно  $376,00 + 11,20 + 2,91 + 0,72 + 0,36 = 391,19 \text{ м}^3 \text{ O}_2$ ,  
 або теоретична витрата повітря на  $100 \text{ м}^3$  природного газу дорівнює  
 $391,19 : 0,21 = 1862,81 \text{ м}^3$ ;

Таблиця 1 – Розрахунок витрати повітря та кількості димових газів

Компоненти, що беруть участь у горінні				Продукти згоряння, димові гази, $\text{м}^3$							
Паливо			Повітря, $\text{м}^3$			CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Усього	
Компо- нент	Кількість		Номер реакції горіння	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>						Усього
	%	$\text{м}^3$									
CH <sub>4</sub>	94,0	94,0	(1)	376,00	1414,48	1790,48	258,50	211,50	1414,48	–	1884,48
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	3,0	3,0	(2)	11,20	42,13	53,33	8,80	5,40	42,13	–	56,33
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,8	0,8	(3)	2,91	10,95	13,86	2,40	1,31	10,95	–	14,66
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,2	0,2	(4)	0,72	2,71	3,43	0,61	0,31	2,71	–	3,63
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,1	0,1	(5)	0,36	1,35	1,71	0,31	0,15	1,35	–	1,81
CO <sub>2</sub>	0,9	0,9	–	–	–	–	0,90	–	–	–	0,90
N <sub>2</sub>	1,0	1,0	–	–	–	–	–	–	1,00	–	1,00
Усього, $\alpha=1,0$	100	100		391,19	1471,62	1862,81	271,52	218,67	1472,62	–	1962,81
Усього, $\alpha=1,1$	100	100		430,31	1618,78	2049,09	271,52	218,67	1619,78	39,12	2149,09

– при  $\alpha=1,1$  практична витрата повітря на  $100 \text{ м}^3$  палива становить  
 $V_n^{1,1} = 2049,09 \text{ м}^3$ , об'єм димових газів –  $2149,09 \text{ м}^3$ .

Визначаємо нижчу теплоту згоряння природного газу:

$$Q_n^p = \sum_{i=1}^n q_i \cdot c_i,$$

де  $q_i$  – тепловий ефект реакції горіння  $i$ -го елемента палива,  $\text{кДж/м}^3$ ;

$c_i$  – вміст  $i$ -го елемента у складі палива, частка;

$n$  – кількість елементів у складі палива.

$$Q_n^p = 35800 \cdot 0,94 + 64940 \cdot 0,03 + 86943 \cdot 0,008 + 118694 \cdot 0,002 + \\ + 146500 \cdot 0,001 = 36679,632 \text{ кДж/м}^3.$$

На підставі розрахунку горіння палива складаємо матеріальний баланс горіння палива (табл. 2).

**Приклад 2.** Скласти тепловий баланс печі та визначити витрату природного газу (див. приклад 1) для виплавлення алюмінієвого сплаву АК5М7 у короткобарабанній печі продуктивністю 3,75 т/год. Склад шихти відповідає середньому хімічному складу сплаву АК5М7, %: 0,434 Mg; 5,665 Si; 7,399 Cu; 0,062 Mn; 0,403 Zn; 1,152 Fe; 84,885 Al. Температура шихти, що завантажу-

Таблиця 2 – Матеріальний баланс горіння палива

Надходження			Витрачання		
Речовина	Кількість		Речовина	Кількість	
	%	м <sup>3</sup>		%	м <sup>3</sup>
Природний газ, у тому числі:	4,65	100,00	Димові гази, в тому числі:	100,00	2149,09
CH <sub>4</sub>	4,37	94,00	CO <sub>2</sub>	12,63	271,52
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,14	3,00	H <sub>2</sub> O	10,18	218,67
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,04	0,80	N <sub>2</sub>	75,37	1619,78
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,01	0,20	O <sub>2</sub> надл	1,82	39,12
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,005	0,10			
CO <sub>2</sub>	0,04	0,90			
N <sub>2</sub>	0,045	1,00			
Повітря, у тому числі:	95,35	2049,09			
O <sub>2</sub>	20,02	430,31			
N <sub>2</sub>	75,33	1618,78			
Усього	100,00	2149,09	Усього	100,00	2149,09

жується, становить 20 °С; температура шлаків, що зливаються, дорівнює 800 °С; температура підігрівання повітря становить 300 °С; температура газів на виході з печі дорівнює 1000 °С.

#### Розв'язання

#### Надходження теплоти

1. Теплота від згоряння палива становить

$$Q_T = Q_n^p \cdot B,$$

де  $Q_n^p$  – нижча теплота згоряння природного газу, кДж/м<sup>3</sup>;

$B$  – витрата палива, м<sup>3</sup>/год.

$$Q_T = 36679,632 \cdot B \text{ кДж/год.}$$

2. Фізична теплота, що вноситься підігрітим повітрям, дорівнює

$$Q_n = B \cdot V_n^{1,1} \cdot C_n \cdot t_n,$$

де  $V_n^{1,1}$  – практична витрата повітря на одиницю палива при  $\alpha = 1,1$  (табл. 2), м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$C_n$  – середня теплоємність повітря при  $t_n$  (табл. А.1), кДж/(м<sup>3</sup>·°С);

$t_n$  – температура підігрівання повітря, °С.

$$Q_n = B \cdot \frac{2049,09}{100} \cdot 1,3181 \cdot 300 = 8102,716 \cdot B \text{ кДж/год.}$$

3. Теплота екзотермічних реакцій при окисненні шихти, що нагрівається, становить

$$Q_{екз} = q \cdot G \cdot a,$$

де  $q = 10^{-2} \cdot \sum_{i=1}^n q_i \cdot C_i$  – тепловий ефект реакції окиснення шихти заданого складу, що нагрівається, кДж/кг;

$C_i$  – вміст  $i$ -го елемента у складі шихти, %;

$q_i$  – тепловий ефект реакції окислення  $i$ -го елемента шихти (табл. А.2), кДж/кг:

$$q = 10^{-2} \cdot (0,434 \cdot 25470 + 5,665 \cdot 30670 + 7,399 \cdot 2468 + 0,062 \cdot 7084 + 0,403 \cdot 5523 + 1,152 \cdot 7306 + 84,885 \cdot 30523) = 28050,866 \text{ кДж/кг;}$$

$G$  – годинна продуктивність печі, кг/год;

$a$  – кількість металу, що окислився (частка від маси шихти), 0,0246.

$$Q_{екз} = 28050,866 \cdot 3750 \cdot 0,0246 = 2588000 \text{ кДж/год.}$$

4. Загальне надходження теплоти становить

$$Q_{np} = Q_T + Q_n + Q_{екз},$$

$$Q_{np} = 44782,348 \cdot B + 2588000 \text{ кДж/год.}$$

### Витрачання теплоти

1. Витрата теплоти на нагрівання та розплавлення металу становить

$$Q_n = G \cdot [C_1 \cdot (t_{nl} - t_n) + i + C_2 \cdot (t_p - t_{nl})],$$

де  $C_1$  – середня теплоємність алюмінію при нагріванні від  $t_n$  до  $t_{пл}$  (табл.А.3), кДж/(кг·°C):

$$C_1 = (C_{t_n} + C_{t_{пл}}) : 2 = (0,890 + 1,255) : 2 = 1,0725 \text{ кДж/(кг·°C)};$$

$C_2$  – середня теплоємність алюмінію при нагріванні від  $t_{пл}$  до  $t_p$  (табл.А.3), кДж/(кг·°C):

$$C_2 = (C_{t_{пл}} + C_{t_p}) : 2 = (1,255 + 1,176) : 2 = 1,2155 \text{ кДж/(кг·°C)};$$

$i$  – прихована теплота плавлення алюмінію,  $i = 389,7$  кДж/кг;

$t_{пл}$  – температура плавлення металу,  $t_{пл} = 660$  °C;

$t_n$  – температура шихти, що завантажується,  $t_n = 20$  °C;

$t_p$  – робоча температура у печі,  $t_p = 850$  °C.

$$Q_n = 3750 \cdot [1,0725 \cdot (660 - 20) + 389,7 + 1,2155 \cdot (850 - 660)] = 4901000 \text{ кДж/год.}$$

2. Теплота, що виноситься шлаками, становить

$$Q_{шл} = G_{шл} \cdot C_{шл} \cdot t_{шл},$$

де  $G_{шл}$  – годинний вихід шлаків, 1250 кг/год;

$C_{шл}$  – середня теплоємність шлаків при  $t_{шл}$ , кДж/(кг·°C):

$$C_{шл} = (C_{NaCl} + C_{KCl}) / 2 = (0,976 + 0,755) / 2 = 0,8655 \text{ кДж/(кг·°C)};$$

$t_{шл}$  – температура зливання шлаку, °C.

$$Q_{шл} = 1250 \cdot 0,8655 \cdot 800 = 866000 \text{ кДж/год.}$$

3. Втрати теплоти з димовими газами, що виходять з робочого простору печі, становлять

$$Q_{\partial z} = B \cdot V_{\partial z}^{1,1} \cdot C_{\partial z} \cdot t_{\partial z},$$

де  $V_{\partial z}^{1,1}$  – об'єм димових газів на одиницю спалюваного палива при  $\alpha=1,1$  (табл.2), м<sup>3</sup>/ м<sup>3</sup>;

$$C_{\partial z} = \sum_{i=1}^n V_i \cdot C_i \text{ – середня теплоємність димових газів при } t_{\partial z}, \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{°C)};$$

$C_i$  – середня теплоємність  $i$ -го продукту згоряння при  $t_{\partial z}$  (табл.А.1), кДж/(м<sup>3</sup>·°C);

$V_i$  – об'ємна частка  $i$ -го продукту згоряння в димових газах (табл. 2);

$$C_{\partial z} = 0,1263 \cdot 2,2266 + 0,1018 \cdot 1,7133 + 0,7537 \cdot 1,3938 + \\ + 0,0182 \cdot 1,4801 = 1,5331 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C});$$

$t_{\partial z}$  – температура димових газів на виході з печі,  $^\circ\text{C}$ .

$$Q_{\partial z} = B \cdot \frac{2149,09}{100} \cdot 1,5331 \cdot 1000 = 32947,698 \cdot B \text{ кДж}/\text{год.}$$

4. Витрати теплоти в результаті хімічної неповноти згоряння палива дорівнюють

$$Q_{хим} = 12100 \cdot B \cdot V_{\partial z}^{1,1} \cdot k_1,$$

де  $k_1$  – кількість палива, що не догоряє, приймаємо  $k_1=0,02$ .

$$Q_{хим} = 12100 \cdot B \cdot \frac{2149,09}{100} \cdot 0,02 = 5200,78 \cdot B \text{ кДж}/\text{год.}$$

5. Втрати теплоти з механічним недогоранням становлять

$$Q_{мех} = B \cdot Q_n^p \cdot k_2,$$

де  $k_2$  – кількість втраченого палива, приймаємо  $k_2=0,03$ .

$$Q_{мех} = B \cdot 36679,63 \cdot 0,03 = 1100,389 \cdot B \text{ кДж}/\text{год.}$$

6. Втрати теплоти у навколишнє середовище становлять

$$Q_{нав} = k_3 \cdot G,$$

де  $k_3$  – питомі втрати теплоти, приймаємо  $k_3=167,5 \text{ кДж}/\text{кг}$ .

$$Q_{нав} = 167,5 \cdot 3750 = 628000 \text{ кДж}/\text{год.}$$

7. Невраховані втрати теплоти дорівнюють

$$Q_{нп} = 0,1 \cdot Q_T,$$

$$Q_{нп} = 0,1 \cdot 36679,632 \cdot B = 3667,963 \cdot B \text{ кДж}/\text{год.}$$

8. Загальні витрати теплоти:

$$Q_{\partial} = Q_n + Q_{шл} + Q_{\partial z} + Q_{хим} + Q_{мех} + Q_{нав} + Q_{нп},$$

$$Q_{\partial} = 42916,83 \cdot B + 6395000 \text{ кДж}/\text{год.}$$

Визначаємо витрату палива  $B$  із рівності статей надходження та витрати теплоти:

$$Q_{np} = Q_v .$$

$$44782,348 \cdot B + 2588000 = 42916,83 \cdot B + 6395000 ,$$

$$B = 2041 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Питома витрата палива  $B_T = 2014 / 3,75 = 544 \text{ м}^3/\text{т}$ .

Після підстановки значень витрати палива дістанемо:

$$Q_T = 74863000 \text{ кДж/год},$$

$$Q_n = 16538000 \text{ кДж/год},$$

$$Q_{\text{ог}} = 67246000 \text{ кДж/год},$$

$$Q_{\text{хим}} = 10615000 \text{ кДж/год},$$

$$Q_{\text{мех}} = 2246000 \text{ кДж/год},$$

$$Q_{\text{нт}} = 7486000 \text{ кДж/год}.$$

Результати розрахунків зводимо в табл. 3.

### **Завдання для самостійної роботи**

**Завдання 1.** Визначити витрату повітря, кількість і склад продуктів згоряння палива, нижчу теплоту згоряння палива при спалюванні в короткобарабанній печі природного газу. Склад природного газу, величина коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha$  надано в табл. 4. Прийняти, що газ сухий, при розрахунках речовини реагують у стехіометричних відношеннях.

**Завдання 2.** Скласти тепловий баланс печі й визначити витрату природного газу (див. завдання 1) для виплавлення алюмінієвого сплаву заданої марки (табл. 5) у короткобарабанній печі продуктивністю  $P$  т/год. Склад шихти для плавлення відповідає середньому хімічному складу сплаву заданої марки. Угар шихти під час плавлення становить 2,7 %. Температура шихти, що завантажується, становить 18 °С; температура шлаків, що зливаються, дорівнює 780 °С; температура підігрівання повітря становить 250 °С; температура газів на виході з печі дорівнює 900 °С.

Таблиця 3 – Тепловий баланс короткобарабанної печі

Надходження теплоти			Витрачання теплоти		
Стаття	Кількість		Стаття	Кількість	
	%	МДж/год		%	МДж/год
1. Теплота від згоряння палива	79,651	74863	1. Теплота на нагрівання і розплавлення металу	5,214	4901
2. Фізична теплота, що внесена підігрітим повітрям	17,596	16538	2. Теплота, що виноситься шлаками	0,921	866
3. Теплота екзотермічних реакцій	2,753	2588	3. Втрати теплоти з димовими газами	71,547	67246
			4. Втрати теплоти від хімічної неповноти згоряння палива	11,294	10615
			5. Втрати теплоти з механічним недогоранням	2,390	2246
			6. Втрати теплоти в навколишнє середовище	0,668	628
			7. Невраховані втрати теплоти	7,965	7486
			8. Нев'язка	0,001	1
Усього	100,00	93989	Усього	100,00	93989

Таблиця 4 – Вихідні дані до завдання 1

№ варіанта	Масова частка елементів природного газу, % (об'ємн.)								Коефіцієнт надлишку повітря $\alpha$
	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	N <sub>2</sub>	
1	85,0	4,4	2,4	1,8	1,3	0,1	5,0	–	1,10
2	98,2	0,5	0,1	–	0,2	–	0,9	0,1	1,05
3	94,0	1,8	0,4	0,1	0,1	0,1	3,5	–	1,06
4	95,1	2,3	0,7	0,4	0,8	0,2	0,5	–	1,08
5	81,7	5,0	2,0	1,2	0,6	0,4	8,5	0,6	1,04
6	98,3	0,3	0,1	0,2	–	0,1	1,0	–	1,05
7	93,3	3,5	1,0	0,5	0,5	0,1	0,4	0,7	1,10
8	87,8	4,4	1,7	0,8	0,6	0,2	1,0	3,5	1,06
9	90,8	5,4	1,2	0,3	0,7	0,6	–	1,0	1,08
10	83,1	9,1	1,4	0,5	0,5	4,1	–	1,3	1,07
11	93,2	0,7	0,6	0,6	0,5	–	–	4,4	1,05
12	92,2	0,8	1,1	1,0	0,4	–	–	4,5	1,10
13	85,0	7,4	1,0	0,8	0,7	0,2	0,3	4,6	1,10
14	91,0	0,2	0,7	0,4	–	0,1	–	7,6	1,04
15	92,4	0,6	–	1,2	0,3	0,1	–	5,4	1,10
16	94,3	–	1,2	0,7	2,0	0,2	0,5	1,1	1,02
17	96,7	2,2	0,2	0,3	0,6	–	–	–	1,08
18	90,2	2,1	0,4	1,0	2,5	0,7	–	3,1	1,10
19	92,0	4,7	0,4	1,8	1,1	–	–	–	1,07
20	95,3	2,0	0,1	1,2	0,6	0,1	0,1	0,6	1,08
21	94,3	1,3	0,4	1,6	1,0	0,4	1,0	–	1,05
22	90,8	4,0	0,8	0,8	0,7	–	0,3	2,6	1,10
23	92,6	3,5	1,1	0,4	0,8	0,5	–	1,1	1,02
24	88,2	5,8	2,0	1,6	1,2	0,9	0,3	–	1,07
25	93,7	2,0	0,7	0,8	0,5	0,1	–	2,2	1,04

Таблиця 5 – Вихідні дані до завдання 2

№ варіанта	Марка сплаву	Продуктивність коротко- барабанної печі $P$ , т/год
1	АЛ4	3,5
2	ВАЛ8	4,0
3	АЛ9-1	4,5
4	АЛ10В	5,0
5	АЛ11	5,5
6	АЛ16В	3,5
7	АЛ25	4,0
8	АЛ30	4,5
9	АЛ32	5,0
10	АЛ34	5,5
11	АК4М4	3,5
12	АК4М2Ц6	4,0
13	АК5М2	4,5
14	АК5М4	5,0
15	АК5М7	5,5
16	АК6М2	3,5
17	АК6М7	4,0
18	АК7	4,5
19	АК7М2	5,0
20	АК7Ц9	5,5
21	АК8п	3,5
22	АК9М2	4,0
23	АК9Ц6	4,5
24	АК12ММгН	5,0
25	АК21М2,5Н2,5	5,5

**Додаток А**  
**ДОВІДКОВІ МАТЕРІАЛИ**

Таблиця А.1 – Середні теплоємності газів

Темпе- ратура, °С	Середні теплоємності газів, кДж/(м <sup>3</sup> ·°С)							
	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	повітря	CO	H <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>
0	1,6204	1,2908	1,3076	1,4914	1,3009	1,3021	1,2777	1,5156
100	1,7200	1,3013	1,3193	1,5019	1,3051	1,3021	1,2896	1,5407
200	1,8079	1,3030	1,3369	1,5174	1,3097	1,3105	1,2979	1,5742
300	1,8808	1,3080	1,3583	1,5379	1,3181	1,3231	1,3021	1,6077
400	1,9436	1,3172	1,3796	1,5592	1,3302	1,3315	1,3021	1,6454
500	2,0453	1,3294	1,4005	1,5831	1,3440	1,3440	1,3063	1,6832
600	2,0592	1,3419	1,4152	1,6078	1,3583	1,3607	1,3105	1,7208
700	2,1077	1,3553	1,4370	1,6338	1,3725	1,3733	1,3147	1,7585
800	2,1517	1,3683	1,4529	1,6601	1,3821	1,3901	1,3189	1,7962
900	2,1915	1,3817	1,4663	1,6865	1,3993	1,4026	1,3230	1,8297
1000	2,2266	1,3938	1,4801	1,7133	1,4118	1,4152	1,3273	1,8632
1100	2,2593	1,4056	1,4935	1,7397	1,4236	1,4278	1,3356	1,8925
1200	2,2886	1,4065	1,5065	1,7657	1,4347	1,4403	1,3440	1,9218

Таблиця А.2 – Теплові ефекти деяких реакцій

Реакція	Q, кДж/кг	Реакція	Q, кДж/кг
Be + 0,5O <sub>2</sub> = BeO	64201	2Cr + 1,5O <sub>2</sub> = Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10870
Si + O <sub>2</sub> = SiO <sub>2</sub>	30670	2Fe + 1,5O <sub>2</sub> = Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7306
2Al + 1,5O <sub>2</sub> = Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30523	Mn + 0,5O <sub>2</sub> = MnO	7084
Mg + 0,5O <sub>2</sub> = MgO	25470	Zn + 0,5O <sub>2</sub> = ZnO	5523
Ti + O <sub>2</sub> = TiO <sub>2</sub>	19060	Ni + 0,5O <sub>2</sub> = NiO	4166
Zr + O <sub>2</sub> = ZrO <sub>2</sub>	11871	Cu + 0,5O <sub>2</sub> = CuO	2468

Таблиця А.3 – Середні теплоємності алюмінію та флюсів

Темпе- ратура, °C	C <sub>p</sub> , кДж/(кг·°C)			Темпе- ратура, °C	C <sub>p</sub> , кДж/(кг·°C)		
	Al	NaCl	KCl		Al	NaCl	KCl
0	0,874	0,854	0,674	500	1,180	0,929	0,741
50	0,914	0,862	0,682	550	1,180	0,938	0,749
100	0,939	0,871	0,687	600	1,217	0,946	0,754
150	0,958	0,879	0,695	650	1,231	0,955	0,762
200	0,977	0,888	0,699	660	1,255	0,955	0,762
250	1,001	0,892	0,708	700	1,176	0,959	0,766
300	1,025	0,900	0,716	750	1,176	0,967	0,755
350	1,052	0,909	0,720	800	1,176	0,976	–
400	1,079	0,917	0,729	850	1,176	–	–
450	1,111	0,921	0,733	900	1,176	–	–

Таблица А.4 – Хімічний склад ливарних алюмінієвих сплавів за

Марка сплаву	Масова частка основних елементів, %				
	Mg	Si	Mn	Cu	інші
1	2	3	4	5	6
АЛ1	1,25...1,75	–	–	3,75...4,50	1,75...2,25·Ni
АЛ3	0,20...0,80	4,50...5,50	0,60...0,90	1,50...3,00	–
АЛ3В	0,35...0,60	4,00...6,00	0,20...0,80	1,50...3,50	–
АЛ4	0,17...0,30	8,00...10,5	0,20...0,50	–	–
АЛ4-1	0,25...0,35	9,00...10,5	0,20...0,35	–	0,08...0,15·Ti
АЛ5	0,35...0,60	4,50...5,50	–	1,00...1,50	–
ВАЛ8	0,20...0,45	7,00...8,50	–	2,50...3,50	0,50...1,00·Zn
»	»	»	»	»	0,10...0,25·Ti
АЛ9-1	0,25...0,40	7,00...8,00	–	–	0,08...0,15·Ti
АЛ10В	0,20...0,50	4,00...6,00	–	5,00...8,00	–
АЛ11	0,10...0,30	6,00...8,00	–	–	7,00...12,0·Zn
АЛ13	4,50...5,50	0,80...1,30	0,10...0,40	–	–
АЛ15В	–	3,00...5,00	0,20...0,60	3,50...5,00	–
АЛ16В	–	3,00...5,00	0,20...0,50	2,00...4,00	2,00...4,00·Zn
АЛ17В	0,10...0,20	3,50...5,50	0,40...0,70	1,50...3,00	5,00...7,00·Zn
АЛ18В	–	1,50...2,50	0,30...0,80	7,50...9,50	1,00...1,80·Fe
АЛ19	–	–	0,60...1,00	4,50...5,30	0,15...0,35·Ti
АЛ21	0,80...1,30	–	0,15...0,25	4,60...6,00	2,60...3,60·Ni
»	»	»	»	»	0,10...0,20·Cr
АЛ22	10,5...13,0	0,80...1,20	–	–	0,05...0,15·Ti
»	»	»	»	»	0,03...0,07·Be
АЛ24	1,50...2,00	–	0,20...0,50	–	3,50...4,50·Zn
»	»	»	»	»	0,10...0,20·Ti
АЛ29	6,00...8,00	0,50...1,00	0,25...0,60	–	–
АЛ30	0,80...1,30	11,0...13,0	–	0,80...1,50	0,80...1,30·Ni
АЛ32	0,30...0,50	7,50...9,00	0,30...0,50	1,00...1,50	0,10...0,30·Ti
АМГ4К1,5М	4,50...5,20	1,30...1,70	0,60...0,90	0,70...1,00	0,10...0,25·Ti
АЛ34	0,35...0,55	6,50...8,50	–	–	0,15...0,40·Be
»	»	»	»	»	0,10...0,30·Ti
АК4М4	–	3,00...5,00	–	3,50...5,50	–
АК4М2Ц6	–	3,50...5,50	0,40...0,70	1,60...3,00	5,00...7,00·Zn
АК5-1	0,40...0,55	4,50...5,50	–	1,00...1,50	0,08...0,15·Ti
АК5М2	0,20...0,80	4,00...6,00	0,20...0,80	1,50...3,50	0,05...0,20·Ti
АК5М2п	0,20...0,80	4,00...6,00	0,20...0,80	1,50...3,50	–
АК5М4	0,20...0,50	3,50...6,00	0,20...0,60	3,00...5,00	0,05...0,20·Ti
АК5М7	0,20...0,50	4,50...6,50	–	6,00...8,00	–
АК6М2	0,35...0,50	5,50...6,50	–	1,80...2,30	0,10...0,20·Ti
АК6М7	0,20...0,50	5,00...6,00	0,30...0,50	6,50...7,50	–

стандартами України, Росії, Німеччини, Франції, США, Японії

Марка сплаву	Масова частка домішок, не більше %								
	Mg	Si	Mn	Cu	Zn	Fe	Pb	Sn	інші
1	7	8	9	10	11	12	13	14	15
АЛ1	-	0,7	-	-	0,3	0,8	-	-	-
АЛ3	-	-	-	-	0,3	1,2	-	-	-
АЛ3В	-	-	-	-	0,5	1,3	-	-	-
АЛ4	-	-	-	0,3	0,3	0,5	0,03	0,008	0,1 Ni, 0,10 Be
АЛ4-1	-	-	-	0,1	0,3	0,3	0,03	0,005	0,15 Be
АЛ5	-	-	0,5	-	0,3	1,0	-	0,010	0,15 Ti+Zr, 0,1 Be
ВАЛ8	-	-	0,5	-	-	0,4	-	-	0,15 Zr, 0,15 Cd
АЛ9-1	-	-	0,1	0,1	0,2	0,4	0,03	-	-
АЛ10В	-	-	0,5	-	0,6	1,2	-	-	0,15 Zr
АЛ11	-	-	0,5	0,6	-	1,2	-	-	-
АЛ13	-	-	-	0,1	0,2	0,5	-	-	0,15 Zr
АЛ15В	0,5	-	-	-	2,0	1,3	-	-	-
АЛ16В	0,5	-	-	-	-	1,2	-	-	-
АЛ17В	-	-	-	-	-	2,0	-	-	-
АЛ18В	0,8	-	-	-	0,5	-	-	-	-
АЛ19	0,5	0,3	-	-	0,2	0,3	-	-	0,1 Ni, 0,2 Zr
АЛ21	-	0,5	-	-	0,3	0,6	-	-	-
АЛ22	-	-	-	-	0,1	1,0	-	-	0,20 Zr
АЛ24	-	0,3	-	0,2	-	0,5	-	-	0,1 Be, 0,1 Zr
АЛ29	-	-	-	0,1	0,2	0,9	-	-	-
АЛ30	-	-	0,2	-	0,2	0,7	0,05	0,01	0,2 Ti, 0,2 Cr
АЛ32	-	-	-	-	0,3	0,8	-	-	0,10 Zr
АМГ4К1,5М	-	-	-	-	0,1	0,4	-	-	-
АЛ34	-	-	0,1	0,3	0,3	0,6	-	-	0,20 Zr
АК4М4	0,5	-	0,6	-	2,0	1,1	-	-	0,5 Ni
АК4М2Ц6	0,3	-	-	-	-	1,2	-	-	-
АК5-1	-	-	0,1	-	0,3	0,5	0,01	-	0,15 Zr
АК5М2	-	-	-	-	1,5	1,0	-	-	0,5 Ni
АК5М2п	-	-	-	-	0,3	1,0	-	-	-
АК5М4	-	-	-	-	1,5	1,2	-	-	0,5 Ni
АК5М7	-	-	0,5	-	0,6	1,2	-	-	0,5 Ni
АК6М2	-	-	0,1	-	0,06	0,5	-	-	0,05 Ni, 0,06 Zr
АК6М7	-	-	-	-	0,4	0,8	-	-	-

Марка сплаву	Масова частка основних елементів, %				
	Mg	Si	Mn	Cu	інші
1	2	3	4	5	6
AK7	0,20...0,55	6,00...8,00	0,20...0,60	–	–
AK7M	0,20...0,60	6,50...8,00	0,20...0,60	1,00...2,00	–
AK7M2	0,20...0,60	6,00...8,00	0,20...0,60	1,50...3,00	–
AK7M2π	0,20...0,60	6,00...8,00	0,20...0,60	1,50...3,00	–
AK7M3Ц2Mг	0,30...0,50	6,50...8,00	–	2,50...3,50	1,50...2,00 Zn
					0,07...0,20 Cr
					0,05...0,20 Ti
AK7Ц9	0,15...0,35	6,00...8,00	–	–	7,00...12,0 Zn
AK8M3	–	7,50...10,0	–	2,00–4,50	–
AK8π	0,40...0,60	6,50...8,50	–	–	0,10...0,30 Ti
					0,15...0,40 Be
AK9	0,20...0,40	8,00...11,0	0,20...0,50	–	–
AK9M2	0,25...0,85	7,50...10,0	0,10...0,40	0,50...2,00	0,05...0,20 Ti
AK9Ц6	0,35...0,55	8,00...10,0	0,10...0,60	0,30...1,50	5,00...7,00 Zn
					0,30...1,00 Fe
AK10Cy	0,15...0,55	9,00...11,0	0,30...0,60	–	0,10...0,25 Sb
AK12MMгH	0,85...1,35	11,0...13,0	–	0,80...1,50	0,80...1,30 Ni
AK12M2	–	11,0...13,0	–	1,80...2,50	0,60...0,90 Fe
AK12M2MгH	0,80...1,30	11,0...13,0	0,30...0,60	1,50...3,00	0,80...1,30 Ni
					0,05...0,20 Ti
AK21M2,5H2,5	0,30...0,60	20,0...22,0	0,20...0,40	2,20...3,00	2,20...2,80 Ni
					0,20...0,40 Cr
					0,10...0,30 Ti
A-S5UZ (FRA)	–	5,00...7,00	0,20...0,60	3,00...5,00	–
A-S9GU (FRA)	0,15...0,50	8,00...11,0	0,25...0,60	0,40...1,00	–
DIN226	0,20...0,50	8,00...11,0	0,10...0,50	2,50...3,50	–
DIN226D	0,10...0,50	8,00...11,0	0,10...0,40	2,50...3,50	–
DIN1725	0,10...0,50	5,00...7,50	0,10...0,60	3,00...5,00	–
ADC12	–	9,60...12,0	–	1,50...3,50	–
380 (USA)	–	7,50...9,50	–	3,00...4,00	–
238 (USA)	0,10...0,40	3,00...5,00	0,50...0,70	9,50...10,5	0,80...1,20 Ni
					0,20...0,30 Ti
328 (USA)	0,20...0,60	7,00...9,00	0,20...0,60	1,00...2,00	0,10...0,40 Ni
					0,20...0,30 Ti
AC4B (JPN)	–	7,00...10,0	–	2,00...4,00	–
AC8B (JPN)	0,50...1,50	8,50...10,5	–	2,00...4,00	0,10...1,00 Ni
AC2A (JPN)	–	4,00...6,00	–	3,00...4,50	–

Марка сплаву	Масова частка домішок, не більше %								
	Mg	Si	Mn	Cu	Zn	Fe	Pb	Sn	інші
1	7	8	9	10	11	12	13	14	15
AK7	-	-	-	1,5	0,5	1,0	-	-	-
AK7M	-	-	-	-	1,0	0,8	-	-	-
AK7M2	-	-	-	-	0,5	1,0	-	-	-
AK7M2π	-	-	-	-	0,3	1,0	-	-	-
AK7M3Ц2Mг	-	-	0,25	-	-	0,5	-	-	-
AK7Ц9	-	-	0,5	0,6	-	1,2	-	-	-
AK8M3	0,45	-	0,5	-	1,2	1,3	0,5	-	0,5 Ni
AK8π	-	-	0,1	0,3	0,3	0,5	-	-	0,5 Pb+Sn
AK9	-	-	-	1,0	0,5	1,2	-	-	0,3 Ni
AK9M2	-	-	-	-	1,2	0,9	0,15	-	0,5 Ni, 0,1 Cr
AK9Ц6	-	-	-	-	-	-	0,3	-	0,3 Ni
AK10Cy	-	-	-	1,8	1,8	1,1	-	-	0,5 Ni
AK12MMгH	-	-	0,2	-	0,2	0,6	0,05	0,01	0,2 Ti, 0,2 Cr
AK12M2	0,2	-	0,5	-	0,8	-	0,15	0,1	0,2 Ti, 0,3 Ni
AK12M2MгH	-	-	-	-	0,5	0,8	0,1	0,02	0,2 Cr
AK21M2,5H2,5	-	-	-	-	0,2	0,9	0,05	0,01	-
A-S5UZ (FRA)	0,3	-	-	-	2,0	1,0	-	-	0,3 Ni, 0,25 Ti
A-S9GU (FRA)	-	-	-	-	0,5	0,9	-	-	0,2 Ni, 0,2 Ti
DIN226	-	-	-	-	1,2	0,7	0,2	0,1	0,3 Ni, 0,15 Ti
DIN226D	-	-	-	-	1,2	1,0	0,2	0,1	0,3 Ni, 0,15 Ti
DIN1725	-	-	-	-	2,0	1,0	-	-	0,3 Ni, 0,15 Ti
ADC12	0,3	-	0,5	-	1,0	0,9	-	-	0,5 Ni, 0,15 Ti
380 (USA)	0,3	-	0,5	-	3,0	1,0	-	0,35	0,5 Ni
238 (USA)	-	-	-	-	1,5	1,5	-	-	-
328 (USA)	-	-	-	-	1,5	1,0	-	-	-
AC4B (JPN)	0,5	-	0,5	-	1,0	1,0	-	-	0,35 Ni, 0,2 Ti
AC8B (JPN)	-	-	0,5	-	0,5	1,0	-	-	0,2 Ti
AC2A (JPN)	0,25	-	0,55	-	0,55	0,8	-	-	0,3 Ni, 0,2 Ti