

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут"

## **ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ЗВАРЮВАННЯ-2**

**Фізико-хімічні та металургійні процеси при зварюванні**

### **МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до самостійної роботи з навчальної дисципліни  
для студентів напряму підготовки 6.050504 "Зварювання"

*Рекомендовано вченою радою  
зварювального факультету  
НТУУ "КПІ"*

Київ 2013

Теорія процесів зварювання-2. Фізико-хімічні та металургійні процеси при зварюванні: методичні вказівки до самостійної роботи з навчальної дисципліни для студентів напряму підготовки 6.050504 "Зварювання" /Уклад.: В.М. Коперсак – К.: НТУУ "КПІ", 2013. – 23 с.

*Гриф надано вченою радою  
зварювального факультету НТУУ "КПІ"  
(Протокол № 6 від 28 лютого 2013 року)*

Навчальне електронне видання

## **ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ЗВАРЮВАННЯ-2**

**Фізико-хімічні та металургійні процеси при зварюванні**

### **МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до самостійної роботи з навчальної дисципліни  
для студентів напряму підготовки 6.050504 "Зварювання"

Укладач:	Коперсак Віктор Миколайович
Відповідальний редактор:	Прохоренко О.В., к.т.н. доцент
Рецензент:	Попель Ю.С., к.т.н. доцент

## Зміст

Вступ .....	4
Питання для самоперевірки .....	5
Єдина система одиниць (SI) .....	15
Фізичні константи і постійні величини .....	17
Ентальпії, ентропії утворення та теплоємності (при постійному тиску) деяких елементів та сполук при стандартних термодинамічних умовах .....	19
Значення коефіцієнта $M_0$ в формулі Уліха для розрахунків ізобарного потенціалу .....	21
Ентальпії $\Delta H_{\text{вип}}^0$ та ентропії $S_{\text{вип}}^0$ випаровування деяких металів .....	21
Рекомендована література .....	22

## Вступ

Навчальна дисципліна "Теорія процесів зварювання" і її друга частина " Фізико-хімічні та металургійні процеси при зварюванні " є наріжним каменем базової теоретичної підготовки бакалавра за напрямом "Зварювання" та подальшого вдосконалення за спорідненими спеціальностями до рівня спеціаліста та магістра.

Самостійній роботі студента з навчальної дисципліни " Теорія процесів зварювання-2. Фізико-хімічні та металургійні процеси при зварюванні " відведено в навчальному процесі чільне місце – до 70 академічних годин впродовж семестру, включаючи контрольні заходи.

За традиціями, які склались у вищій школі, вивчення будь-якої дисципліни передбачає велику кількість вдумливої, продуктивної самостійної роботи. Сюди входять: виконання індивідуальних завдань, підготовка до практичних занять і лабораторних робіт, обробка результатів лабораторних і практичних занять, підготовка Звітів, підготовка до контрольних робіт та інших видів контрольних заходів, періодичне повторення пройденого на лекціях матеріалу, написання Рефератів, Оглядів літератури, тощо – за вказівкою викладача.

Як показує досвід, самостійна робота виконується пересічним студентом за залишковим принципом, а залишку часу, зазвичай, не буває багато.

Даний методичний посібник покликаний дещо послабити цю ваду і допомогти студенту систематизувати самостійну роботу. Текст включає питання для самоперевірки, які допоможуть засвоїти лекційний матеріал, організацію одиниць вимірювань (система *SI*), які зустрічаються під час виконання лабораторних робіт і проведення практичних занять, значення часто вживаних у розрахунках фізичних величин, розрахункові формули та таблиці значень специфічних математичних функцій, номограми і графіки, які спрощують і унаочнюють виконувані обчислення.

## Питання для самоперевірки

1. Що називають реакційною зоною зварювання?
2. Назвіть основні складові типової реакційної зони зварювання.
3. Які області (фази) прийнято виділяти окремо в реакційній зоні зварювання?
4. Які компоненти складають тверду фазу реакційної зони зварювання?
5. Які компоненти складають рідку фазу реакційної зони зварювання?
6. Які компоненти складають газову фазу реакційної зони зварювання?
7. Які є головні специфічні особливості умов протікання взаємодій у реакційній зоні зварювання?
8. Які головні питання може висвітлити фізико-хімічний аналіз процесів у реакційній зоні зварювання?
9. Яке визначення зварюванню дає термодинаміка?
10. Хто і коли винайшов і ввів у наукове користування термін «термодинаміка»?
11. Назвіть головні закони термодинаміки.
12. Які межі існують для використання універсальних принципів термодинаміки?
13. Сукупність яких показників називають стандартними термодинамічними умовами?
14. Дайте визначення Першого начала термодинаміки.
15. Що називають в термодинамічному аналізі «термодинамічною системою»?
16. Що називають в термодинамічному аналізі «навколишнім середовищем»?

17. Що називають в термодинамічному аналізі «контрольною поверхнею»?
18. Що називають в термодинамічному аналізі «ізолюваною системою»?
19. Що називають в термодинамічному аналізі «закритою системою»?
20. Що називають в термодинамічному аналізі «відкритою системою»?
21. Що називають в термодинамічному аналізі «гомогенною системою»?
22. Що називають в термодинамічному аналізі «гетерогенною системою»?
23. Що називають в термодинамічному аналізі параметром стану»?
24. Що називають в термодинамічному аналізі «фазою»?
25. Що називають в термодинамічному аналізі «екстенсивними параметрами»?
26. Що називають в термодинамічному аналізі «інтенсивними параметрами»?
27. Що називають в термодинамічному аналізі «внутрішніми параметрами»?
28. Що називають в термодинамічному аналізі «зовнішніми параметрами»?
29. Що називають в термодинамічному аналізі «процесом»?
30. Що називають в термодинамічному аналізі «речовиною»?
31. Що називають в термодинамічному аналізі «енергією»?
32. Які процеси відносять до зворотних?
33. Які процеси відносять до незворотних?
34. Чи може бути самочинний процес зворотнім і чому?

35. Наведіть математичне тлумачення Першого начала термодинаміки.
36. Сформулюйте Наслідок Першого начала термодинаміки.
37. Визначте роботу термодинамічної системи в ізохорному процесі.
38. Визначте роботу термодинамічної системи в ізобарному процесі.
39. Визначте роботу термодинамічної системи в ізотермічному процесі.
40. Визначте роботу термодинамічної системи в адіабатичному процесі.
41. Як термодинаміка визначає тепловий ефект хімічних реакцій?
42. Сформулюйте Закон Гесса.
43. Наведіть наслідки Закону Гесса.
44. Сформулюйте Закон Кірхгофа стосовно теплового ефекту хімічної реакції.
45. Дайте визначення поняття теплоємності речовин.
46. Чому показник теплоємності є таким важливим в термохімічних розрахунках?
47. Дайте визначення поняття теплоємності в ідеальних термодинамічних процесах.
48. Яке співвідношення пов'язує теплоємності термодинамічної системи в ізобарному і в ізохорному процесах?
49. Які закономірності визначають теплоємність одноатомних газів?
50. Які закономірності визначають теплоємність багатоатомних газів?
51. Які закономірності визначають теплоємність твердих тіл?

52. Які закономірності визначають теплоємність рідин?
53. Наведіть кілька визначень Другого начала термодинаміки.
54. Наведіть математичний вираз Другого начала термодинаміки.
55. В чому полягає суть циклу Карно?
56. Яким є головний висновок з аналізу циклу Карно стосовно коефіцієнту корисної дії ідеальної теплової машини?
57. Яким чином з аналізу циклу Карно виводяться поняття приведенної теплоти та ентропії?
58. Які логічні перешкоди є щодо застосування поняття теплової смерті термодинамічної системи до всього спостережуваного світу?
59. Яким чином обчислюються значення зміни ентропії в термодинамічних процесах?
60. Дайте формулювання Теплової теореми Нернста.
61. На підставі яких суджень Тепловій теоремі Нернста присвоюють статус Третього начала термодинаміки?
62. Дайте математичний вираз термодинамічного потенціалу системи в ізохорному процесі.
63. Дайте математичний вираз термодинамічного потенціалу системи в ізобарному процесі.
64. Що називають вільною і зв'язаною енергією термодинамічної системи?
65. Наведіть термодинамічне визначення хімічної спорідненості.
66. Як обчислюється термодинамічний потенціал хімічних реагентів?
67. Як термодинаміка визначає ентальпії утворення хімічних елементів в стандартних термодинамічних умовах?



68. Наведіть математичний вираз формули Уліха. Для яких цілей вона використовується?
69. Дайте визначення хімічного потенціалу речовини в процесі з постійним тиском.
70. Чи може бути рівною нулю сума хімічних потенціалів реагуючих речовин?
71. Як обчислюється хімічний потенціал речовин?
72. Дайте визначення константи рівноваги хімічної реакції.
73. Дайте визначення рівнянню ізотерми хімічної реакції Вант-Гоффа.
74. Які показники пов'язує між собою рівняння ізотерми хімічної реакції Вант-Гоффа?
75. Дайте визначення числа компонентів термодинамічної системи.
76. Які параметри термодинамічної системи називають вільними або степенями свободи?
77. Яка залежність пов'язує між собою число вільних параметрів термодинамічної системи, число фаз і число компонентів у ній?
78. Як застосовують карбонати для захисту реакційної зони зварювання і як визначають температури їх розкладу?
79. Що називають ступенем дисоціації газу?
80. Які показники застосовують для характеристики розчинів і як їх класифікують?
81. Як визначається пружність пари розчинника над розчином?
82. Яким чином можна з термодинамічних характеристик речовини визначити температуру її кипіння?
83. Як впливає величина тиску на температуру кипіння речовини?
84. Як визначається пружність пари розчиненої речовини?
85. Наведіть формулювання Закону Генрі.

86. Наведіть формулювання Закону Рауля.
87. Які типи розчинів відносять до досконалих розчинів?
88. На які види поділяють реальні розчини?
89. Дайте визначення термодинамічної активності речовини в розчині.
90. Як відбувається взаємодія двох розчинів через спільну газову фазу?
91. Дайте визначення закону розподілу.
92. Які закономірності регулюють розчинність одноатомних газів у металах?
93. Які закономірності регулюють розчинність двоатомних газів у металах?
94. Дайте визначення Закону Сівертса.
95. Які закономірності регулюють окислення металевих розплавів з газової фази?
96. Що називають розкисленням?
97. За якими речовинами закріпився термін «розкислювачі».
98. Як впливає парціальний тиск кисню в газовій фазі на процес окислення металу?
99. Що називають пружністю дисоціації оксиду?
100. Що таке є ряд спорідненості елементів до кисню і чому він різний при різних температурах?
101. Як знайти граничну температуру існування оксиду в чистому кисні і в атмосфері?
102. Як змінюється спорідненість металу до кисню при переході цього металу в розчин?
103. Що називають розкислювальною здатністю хімічного елемента?

104. Які елементи можуть служити розкислювачами при температурі 1800°C, при 2700°C?
105. Розкажіть про насичення металу зварювальної ванни киснем з газової фази.
106. Як впливає розчинений кисень на властивості металу зварного шва?
107. Розкажіть основні принципи взаємодії азоту з металом зварювальної ванни.
108. Як впливає наявність кисню в газовій фазі на розчинність азоту в металі зварювальної ванни?
109. Як впливає розчинений азот на властивості металу зварного шва?
110. Що розуміють під старінням металу, насиченого азотом?
111. Назвіть можливі шляхи боротьби зі шкідливим впливом азоту на метал зварного шва.
112. Розкажіть основні принципи взаємодії водню з металом зварювальної ванни.
113. В яких специфічних одиницях вимірюється кількість розчиненого в металі водню і чому?
114. Охарактеризуйте відмінності в явищах, які позначаються термінами «дифузійний» і «залишковий» водень.
115. Які види захисту металу зварювальної ванни від повітря ви знаєте?
116. Який показник застосовують для характеристики якості та надійності захисту металу зварного шва від повітря?
117. Розкажіть про газовий захист реакційної зони зварювання.
118. Як працює газошлаковий захист реакційної зони зварювання від повітря?

119. Які головні інгредієнти входять до складу електродних покриттів?
120. Як класифікують компоненти електродних покриттів?
121. Як класифікують зварювальні електроди?
122. Які компоненти входять до складу рудно-кислих електродних покриттів?
123. Які компоненти входять до складу фтористо-кальцієвих електродних покриттів?
124. Які компоненти входять до складу рутилових електродних покриттів?
125. Які компоненти входять до складу органічних електродних покриттів?
126. Який вид захисту реакційної зони зварювання формує порошковий дріт?
127. В чому полягає суть шлакового захисту реакційної зони зварювання?
128. Як класифікують зварювальні флюси?
129. Які головні компоненти входять до складу зварювальних флюсів?
130. Розкажіть про основні принципи кристалічної будови речовин.
131. Що називають електровід'ємністю.
132. Дайте визначення ковалентного зв'язку.
133. Дайте визначення іонного зв'язку.
134. Дайте визначення молекулярного зв'язку.
135. Дайте визначення металічного зв'язку.
136. Які ознаки лужності чи кислотності шлаку?
137. Які структурні одиниці залежно від співвідношення кисню і кремнію утворюються в силікатних розплавах?

138. В чому полягає суть молекулярної теорії будови шлаків?
139. В чому полягає суть іонної теорії будови шлаків?
140. Назвіть основні фізико-хімічні властивості зварювальних шлаків.
141. Як визначається густина зварювальних шлаків і на що впливає цей показник?
142. Як визначається в'язкість зварювальних шлаків і на що впливає цей показник?
143. Як визначається поверхневий натяг зварювальних шлаків і на що впливає цей показник?
144. Як визначається міжфазний натяг на границі шлак-метал зварювальних шлаків і на що впливає цей показник?
145. Як визначає іонна теорія будови шлаків взаємодію на границі шлак-метал?
146. Розкажіть про принципи легування металу зварювальної ванни.
147. Розкажіть про принципи рафінування металу зварювальної ванни.
148. Які показники найбільше впливають на коефіцієнти переходу легуючих елементів?
149. Розкажіть про шкідливий вплив сірки на властивості зварного шва.
150. Розкажіть про шляхи запобігання попаданню сірки в реакційну зону зварювання.
151. Розкажіть про шкідливий вплив фосфору на властивості зварного шва.
152. Розкажіть про шляхи запобігання попаданню фосфору в реакційну зону зварювання.

153. Чим розрізняються між собою гомогенна і гетерогенна кристалізація?
154. Як впливає величина переохолодження на процес кристалізації?
155. Чому чисті метали кристалізуються при певній температурі, а сплави – в інтервалі температур?
156. Чому для початку кристалізації потрібне переохолодження?
157. Які є головні особливості кристалізації металу при зварюванні?
158. Чи буває кристалізація металу при зварюванні рівноважною?
159. Розкажіть про принципи утворення концентраційного переохолодження.
160. Які різні типи кристалізації металу можуть сформуватись залежно від величини концентраційного переохолодження?
161. При яких умовах ймовірність утворення гілчастої дендритної структури більша і чи корисно це для якості металу шва?
162. Які є методи управління первинною кристалізацією металу шва?
163. Які причини можуть викликати появу пор в металі зварного шва?
164. Які заходи запобігання появі пор при зварюванні низьковуглецевих сталей є найбільш ефективними?
165. Які причини можуть викликати появу неметалевих включень в металі зварного шва?
166. Як можна запобігти появі неметалічних включень в зварному шві?
167. Як класифікуються тріщини в зварних швах?
168. Які види тріщин відносяться до гарячих?
169. Які види тріщин відносяться до холодних?

170. Чим відрізняються між собою кристалізаційні і підсолідусні тріщини?
171. Що називають технологічною міцністю матеріалу?
172. Розкажіть про температурний інтервал крихкості.
173. Як впливає швидкість охолодження на положення лінії температур солідусу?
174. Які причини можуть викликати появу підсолідусних (полігонізаційних) тріщин?
175. Який вид тріщин відносять до холодних?
176. Розкажіть про гартівну гіпотезу утворення холодних тріщин.
177. Розкажіть про водневу гіпотезу утворення холодних тріщин.
178. Як впливає швидкість охолодження на показники пластичності металу навколошовної зони?
179. Охарактеризуйте можливі шляхи і способи запобігання появи холодних тріщин при зварюванні.
180. Розкажіть про методику розрахунку температури попереднього підігрівання за Д. Сеферіаном.
181. Дайте визначення поняттю «еквівалентний вуглець». Для чого застосовується цей показник?
182. Яким є механізм позитивного впливу попереднього підігрівання на стійкість зварного з'єднання до утворення тріщин?
183. Охарактеризуйте узагальнену схему Зінера появи холодних тріщин при зварюванні.

## Єдина система одиниць (SI)

### 1. Основні та додаткові одиниці

Величина	Одиниця		
	Найменування	Позначення	
		Міжнародне	Українське
<b>ОСНОВНІ ОДИНИЦІ</b>			
Довжина	метр	<i>m</i>	м
Маса	кілограм	<i>kg</i>	кг
Час	секунда	<i>s</i>	с
Електричний струм	Ампер*	<i>A</i>	А
Температура	Кельвін	<i>K</i>	К
Кількість речовини	моль	<i>mol</i>	моль
Світло	кандела	<i>kd</i>	кд
<b>ДОДАТКОВІ ОДИНИЦІ</b>			
Плоский кут	радіан	<i>rad</i>	рад
Тілесний кут	стерадіан	<i>sr</i>	ср

### 2. Похідні одиниці, які мають спеціальні назви.

Величина	Одиниця			Вираз через основні та додаткові одиниці
	Найменування	Позначення		
		Міжнародне	Українське	
Частота	Герц	<i>Hz</i>	Гц	$c^{-1}$
Сила	Ньютон	<i>N</i>	Н	$m \cdot kg \cdot c^{-2}$
Тиск	Паскаль	<i>Pa</i>	Па	$m^{-1} \cdot kg \cdot c^{-2}$
Енергія	Джоуль	<i>J</i>	Дж	$m^2 \cdot kg \cdot c^{-2}$
Потужність	Ватт	<i>W</i>	Вт	$m^2 \cdot kg \cdot c^{-3}$
Кількість електрики	Кулон	<i>C</i>	Кл	$c \cdot A$
Електрична напруга	Вольт	<i>V</i>	В	$m^2 \cdot kg \cdot c^{-3} \cdot A^{-1}$
Електрична ємність	Фарада	<i>F</i>	Ф	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot c^4 \cdot A^2$
Електричний опір	Ом	<i>Ω</i>	Ом	$m^2 \cdot kg \cdot c^{-3} \cdot A^{-2}$
Електрична провідність	Сіменс	<i>S</i>	См	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot c^3 \cdot A^2$
Потік магнітної індукції	Вебер	<i>Wb</i>	Вб	$m^2 \cdot kg \cdot c^{-2} \cdot A^{-1}$
Магнітна індукція	Тесла	<i>T</i>	Тл	$kg \cdot c^{-2} \cdot A^{-1}$
Індуктивність	Генрі	<i>H</i>	Гн	$m^2 \cdot kg \cdot c^{-2} \cdot A^{-2}$
Світловий потік	люмен	<i>lm</i>	лм	кд·ср
Освітленість	люкс	<i>lx</i>	лк	$m^{-2} \cdot кд \cdot ср$
Активність радіонукліда	Беккерель	<i>Bq</i>	Бк	$c^{-1}$
Поглинена доза іонізуючого випромінювання	Грей	<i>Gy</i>	Гр	$m^2 \cdot c^{-2}$
Еквівалентна доза випромінювання	Зіверт	<i>Sv</i>	Зв	$m^2 \cdot c^{-2}$

\* Найменування та позначення одиниць вимірювання, названих прізвищами видатних людей, пишуться з великої літери



## Фізичні константи і постійні величини

а.о.м. – атомна одиниця маси,  $1 \text{ а.о.м.} = 1,66056 \times 10^{-27} \text{ кг}$

$e_0$  – заряд електрона,  $e_0 \approx 1,60217733 \times 10^{-19} \text{ Кл}$

$m_e$  – маса електрона,  $m_e \approx 9,1093897 \times 10^{-31} \text{ кг}$

$S_e$  – ентропія вільних електронів, так званого «електронного газу»,

$$\Delta S_e^0 = S_e = 20,64 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$$

е.-В. – електрон-вольт,  $1 \text{ е.-В.} \approx 1,602177 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$

$k$  – постійна Больцмана,  $k \approx 1,380658 \times 10^{-23} \text{ Дж/К}$

$h$  – постійна Планка,  $h \approx 6,6260755 \times 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$

$c$  – швидкість світла у вакуумі,  $c \approx 299792458,0 \text{ м/с}$

$N_0$  – число Авогадро,  $N_0 = 6,022 \times 10^{23}$

$R$  – універсальна газова постійна,  $R = 8,31451 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$

$\sigma$  – коефіцієнт Стефана – постійна величина, яка характеризує випромінювання енергії (теплоти) абсолютно чорним тілом:

$$\sigma \approx 5,67051 \cdot 10^{-8} \text{ Дж/(м}^2\cdot\text{К}^4\cdot\text{с)}$$

$\varepsilon$  – ступінь чорноти тіла: для абсолютно чорного тіла  $\varepsilon = 1,0$

$e$  – основа натуральних логарифмів,  $e \approx 2,718282$

$A$  – постійна Річардсона (катодної емісії),  $A \approx (4\dots7) \times 10^5 \text{ А/(м}^2\cdot\text{К}^2)$ ,

або  $40\dots70 \text{ А/(см}^2\cdot\text{К}^2)$ , або можливі такі варіанти:

а) для оксидних та плівкових катодів – в межах:

$$A \approx (0,1\dots1,0) \times 10^5 \text{ А/(м}^2\cdot\text{К}^2), \text{ або } 1,0\dots10 \text{ А/(см}^2\cdot\text{К}^2);$$

б) в розрахунках, обмежених режимами катодів зварювальної дуги, можна рекомендувати такі значення коефіцієнту Річардсона:

• для тугоплавких металів з температурою кипіння  $T_k > 4000 \text{ К}$

$$(W, Mo, Ta, \text{ ін.}) A \approx 7,0 \cdot 10^5 \text{ А/(м}^2\cdot\text{К}^2);$$

- для інших металів з температурою кипіння  $T_k < 4000\text{K}$

$$(Fe, Ti, Al, \text{ін}) A \approx 6,0 \cdot 10^5 \text{ A}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^2);$$

- у випадку, коли катод не являє собою чистий метал (плівковий чи оксидний катод), тоді, з огляду на досить слабку розробку цього питання в літературі, можна використовувати середнє з відомих дослідних значень:  $A \approx 0,5 \cdot 10^5 \text{ A}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^2)$ , якщо немає інших вказівок.

**Ентальпії, ентропії утворення та теплоємкості  
(при постійному тиску) деяких елементів та сполук при стандартних термодинамічних умовах**

речовина	стан	$\Delta H_{298}^{\circ}, \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$	$S_{298}^{\circ}, \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$	$C_{p, 298}^{\circ}, \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$
Al	кристал	0	28,31	24,34
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	кристал	-1675,0	50,94	79,00
BaCO <sub>3</sub>	кристал	-1202	112,1	85,35
BaO	кристал	-556,6	70,3	47,23
C	газ	0	5,74	8,53
CaCO <sub>3</sub>	кристал	-1206,0	92,90	81,85
CaF <sub>2</sub>	кристал	-1214,0	68,87	67,03
CaO	кристал	-635,1	39,70	42,80
CaSiO <sub>3</sub>	кристал	-1579,8	87,5	86,52
CO	газ	-110,5	197,40	29,15
CO <sub>2</sub>	газ	-393,51	213,60	37,13
Cr	кристал	0	23,76	23,38
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	кристал	-1141,0	81,10	104,6
Cu	кристал	0	33,30	24,51
Cu <sub>2</sub> O	кристал	-167,36	93,93	63,64
CuO	кристал	-165,3	42,64	44,78
Ca	кристал	0	41,62	26,26
F	газ	79,51	158,64	22,74
F <sub>2</sub>	газ	0	202,9	31,32
Fe	кристал	0	27,15	25,23
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	кристал	-821,32	89,96	103,70
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	кристал	-1117,7	151,46	143,40
FeCO <sub>3</sub>	кристал	-747,68	92,88	82,13
FeO	кристал	-263,68	58,79	48,12
H	газ	217,9	114,60	20,79
H <sub>2</sub>	газ	0	130,60	28,83
H <sub>2</sub> O	газ	-241,84	188,74	33,56
HF	газ	-268,61	173,51	29,16
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	кристал	-1151,0	155,6	114,5
K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	кристал	-2033	291,21	219,7
K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	кристал	-1383	200,0	146,0
K <sub>2</sub> O	кристал	-363,4	94,2	83,7
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	кристал	-1433,44	175,73	129,9
KMnO <sub>4</sub>	кристал	-813,37	171,71	119,25
KNO <sub>3</sub>	кристал	-492,71	132,93	96,27

речовина	стан	$\Delta H_{298}^{\circ}, \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$	$S_{298}^{\circ}, \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$	$C_{p, 298}^{\circ}, \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$
LiNO <sub>3</sub>	кристал	-482,33	105,44	80,12
Mg	кристал	0	32,55	24,80
MgCO <sub>3</sub>	кристал	-1096,2	65,69	75,52
MgO	кристал	-601,24	26,94	37,41
Mn	кристал	0	31,76	26,32
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	кристал	-959,81	110,46	107,70
Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	кристал	-1386,6	148,53	139,70
MnCO <sub>3</sub>	кристал	-894,96	85,77	81,50
MnO	кристал	-384,93	60,25	44,83
MnO <sub>2</sub>	кристал	-519,65	53,14	54,02
Mo	кристал	0	28,58	23,75
MoO <sub>3</sub>	кристал	-755,00	78,21	73,65
N	газ	358,0	153,20	20,79
N <sub>2</sub>	газ	0	191,50	29,10
N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	газ	9,37	304,3	78,99
N <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	газ	13,3	355,65	95,28
Na	кристал	0	51,42	28,22
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	кристал	-1129,0	136,00	110,00
Na <sub>2</sub> O	кристал	-418,3	75,1	69,15
NaF	кристал	-570,3	51,3	46,82
Nb	кристал	0	36,61	16,92
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	кристал	-1903,7	137,23	126,86
NbO	кристал	-399,57	48,12	26,47
Ni	кристал	0	29,86	26,05
NiO	кристал	-239,7	38,07	44,27
NO	газ	90,37	210,62	29,83
NO <sub>2</sub>	газ	33,89	240,45	37,11
O	газ	249,18	160,95	21,90
O <sub>2</sub>	газ	0	205,03	29,36
OH	газ	38,96	183,64	29,89
Si	кристал	0	18,72	19,80
Si	газ	468,89	167,96	22,3
SiF <sub>4</sub>	газ	-1548,0	281,60	73,37
SiO <sub>2</sub>	кристал	-859,30	42,09	44,48
Ti	кристал	0	30,66	25,00
TiO <sub>2</sub>	кристал	-943,90	50,23	56,44
V	кристал	0	29,29	24,49
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	кристал	-1230,1	98,32	103,96
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	кристал	-1561,7	131,05	129,80

**Значення коефіцієнта  $M_0$  в формулі Уліха для  
розрахунків ізобарного потенціалу:**

$$M_0 = \int_{298}^T \frac{1}{T} dT - \frac{1}{T} \int_{298}^T dT = \ln \frac{T}{298,16} + \frac{298,16}{T} - 1$$

$M_0$	T, К
0	298
0,11329	500
0,50828	1000
0,57649	1100
0,64091	1200
0,70184	1300
0,75956	1400
0,81436	1500
0,86648	1600
0,91614	1700
0,96355	1800
1,00890	1900
1,05235	2000
1,09404	2100
1,13411	2200
1,17266	2300
1,20983	2400
1,24568	2500
1,28031	2600
1,31380	2700
1,34623	2800
1,37765	2900
1,40812	3000

$M_0$	T, К
1,43770	3100
1,46645	3200
1,49439	3300
1,52159	3400
1,54807	3500
1,57388	3600
1,59904	3700
1,62358	3800
1,64755	3900
1,67095	4000
1,69383	4100
1,71620	4200
1,73808	4300
1,75949	4400
1,78046	4500
1,80099	4600
1,82112	4700
1,84085	4800
1,86020	4900
1,87919	5000

$M_0$	T, К
1,89782	5100
1,91612	5200
1,93408	5300
1,95174	5400
1,96908	5500
1,98613	5600
2,00290	5700
2,01939	5800
2,03561	5900
2,05157	6000
2,06729	6100
2,08276	6200
2,09800	6300
2,11301	6400
2,12779	6500
2,14237	6600
2,15673	6700
2,17089	6800
2,18485	6900
2,19862	7000

**Ентальпії  $\Delta H_{\text{вип}}^0$  та ентропії  $S_{\text{вип}}^0$  випаровування  
деяких металів**

Елемент	<i>Al</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Ni</i>	<i>Si</i>	<i>Ti</i>	<i>W</i>	<i>Zn</i>
$\Delta H_{\text{вип}}^0, \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$	272,0	304,8	354,0	365,3	304,0	445,0	830,0	114,8
$S_{\text{вип}}^0, \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$	117,1	106,3	115,0	118,0	104,8	213,4	104,3	97,1

## Рекомендована література

### 1. Основна література:

- 1.1. Коперсак В.М. Теорія процесів зварювання-2. Фізико-хімічні та металургійні процеси при зварюванні. Текст лекцій., - К., 2011. – 252 с.  
<http://library.weld.kpi.ua/welding-processes>
- 1.2. Коперсак В.М. «Теорія процесів зварювання». Текст лекцій. Ч.ІІ; НТУУ “КПІ”, 2001.- 119 с.
- 1.3. Коперсак В.М. Теорія процесів зварювання-1. Джерела нагрівання та теплові процеси при зварюванні. Текст лекцій /, - К., 2011. – 384 с. <http://library.weld.kpi.ua/welding-processes>
- 1.4. Коперсак В.М. «Теорія процесів зварювання». Текст лекцій. Ч.І; НТУУ “КПІ”, 2001.- 141 с.
- 1.5. Теория сварочных процессов. Под. ред. В.В.Фролова.- М.: Высш. шк., 1988.- 560 с.
- 1.6. Петров Г.Л.,Тумарев А.С. Теория сварочных процессов /с основами физической химии.- 2-е изд.- М.: Высш. шк., 1977.- 392 с.
- 1.7. Багрянский К.В., Добротина З.А., Хренов К.К. Теория сварочных процессов.- 2-е изд. переработ.- Киев: Вища. шк., 1976.- 424 с.
- 1.8. Теория сварочных процессов под. ред. В.М. Неровного. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007, - 752 с.
- 1.9. Коперсак В.М. Термодинаміка і теплові процеси при зварюванні. Текст лекцій. Київ НТУУ КПІ, 2006. - 124 с.
- 1.10. Ерохин А.А. Основы сварки плавлением.- М.: Машиностроение, 1978.- 447 с.

1.11. Кох Б.А. Основы термодинамики металлургических процессов сварки.- Л.: Судостроение, 1975.- 240 с.

## 2. Додаткова література:

2.1. Сефериан Д. Металлургия сварки.- М.: МашГИЗ, 1963.- 347 с.

2.2. Жуховицкий А.А., Шварцман Л.А. Физическая химия.- М.: Металлургия, 1976.- 543 с.

2.3. Підгаєцький В.В. Пори, включення і тріщини в зварних швах.- Київ: Техніка, 1970.- 236 с.

2.4. Петров Г.Л. Сварочные материалы.- М.: Машиностроение, 1972.- 274 с.

2.5. Лившиц Л.С. Металловедение для сварщиков. М.: Машиностроение, 1979.- 243 с.

2.6. Ерёмин Е.М. Основы химической термодинамики.- М.: Машиностроение, 1986.- 274 с.

2.7. Кудрявцев П.С. Курс истории физики.- 2-е изд.- М.: Просвещение, 1982.- 447 с.

2.8. Подгаецкий В.В., Кузьменко В.Г. Сварочные шлаки.- Киев: