

## СПОЖИВЧІ ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВІВ ТИТАНУ

*В.С.Богушевський, І.О.Заболотна*

*Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»*

*Розглянута технологія отримання лігатур і шихтової заготовки із рудних матеріалів, шлаків і шлаків доменного, сталеплавильного, ферросплавного і гальванічного виробництва на базі рідкофазної відновлювальної плавки.*

*Рассмотрена технология получения лигатур и шихтовой заготовки из рудных материалов, шлаков и шламов доменного, сталеплавильного, ферросплавного и гальванического производства на базе жидкофазной восстановительной плавки.*

*Technology of receipt of addition alloys and rod charge is considered from ore materials, slags and slurry of blast-furnace, steel-smelting, ferro-alloy and galvanic production on the base of the liquid phase reduction smelting.*

### **Вступ**

У земній корі міститься близько 0,6 % титану [1]. По поширеності він займає четверте місце після алюмінію, заліза і магнію. Титан відрізняється поєднанням таких цінних властивостей, як мала щільність, високий рівень питомої міцності, корозійній стійкості, холодостійкості, немагнітністю і рядом інших цінних фізико-механічних характеристик. Завдяки своїм привабливим якостям титан знайшов застосування, передусім в авіакосмічній і військовій промисловості, а також в деяких цивільних галузях, наприклад в автомобілебудуванні, при виробництві двигунів високошвидкісних автомобілів, в системах підвісок, виготовленні колінчастих валів, з'єднувальної тяги і вихлопних систем; у хімічній промисловості, енергетиці, суднобудуванні, медицині і т. д.

Головною перешкодою на шляху розширення галузі застосування титану є його ціна. Собівартість титану в кілька разів вища, ніж алюмінію. Тому власники підприємств шукають менш дорогі способи виробництва, які допоможуть зробити їх продукцію привабливішою для найрізноманітніших ринків.

## **Виробництво титану**

Виробництво титанової продукції є багатостадійним, наукомістким і технологічно складним процесом. Гірничо-збагачувальні комбінати (ГЗК) добувають сировину, збагачують її, переробляють і поставляють концентрат на підприємства, які виготовляють губчастий титан, який потім поступає на металургійні підприємства, що виплавляють металевий титан, а з нього отримують зливки, прокат, штампування.

Уникнути проблем, пов'язаних з виготовленням і переплавою електроду, що витрачається, залучити в переробку більшу кількість титанових відходів дозволяють різні способи плавки титану з електродом, що не витрачається. Це можуть бути вакуумно-дугова, плазмово-дугова і електрошлакові технології.

В якості електродів, що не витрачаються, при переплавці титана застосовують вольфрам і графіт, а також мідні водоохолоджувальні електроди. Але і тут виникають проблеми. Так званий електрод, що не витрачається, все ж піддається ерозії, внаслідок чого відбувається забруднення титанового зливка включеннями матеріалу електроду. Вольфрамовий електрод розтріскується, розмивається бризками металу, що переплавляється, внаслідок чого в отриманому зливку можна знайти мікрочастки вольфраму. Для надійної роботи матеріал, з якого виготовлений електрод, що не витрачається, повинен відрізнятися хорошими емісійними властивостями і високою термостійкістю.

Для поліпшення умов роботи у вольфрамовий електрод вводять торій, лантан або ітрій. Такі добавки не лише знижують роботу виходу електронів і забезпечують вищу допустиму щільність струму дуги, але й підвищують температуру рекристалізації вольфраму, тобто запобігають окрихчуванню і підвищують його стійкість.

У разі застосування графітових електродів, що не витрачаються, виявлено науглецювання титана, для зменшення якого графітовий електрод просочують титаном.

Титан відноситься до хімічно активних металів, тому його переплавку, плавку і розливання проводять у вакуумі або захисному середовищі. При високих температурах, тим більше в рідкому стані, титан інтенсивно реагує з усіма вогнетривкими матеріалами, у тому числі і з оксидами, що зазвичай входять до складу вогнетривів, внаслідок чого забруднюється киснем. Плавка титану в графітових тиглях приводить до забруднення його вуглецем. Вміст домішок в титані істотно впливає на його механічні властивості. Розрізняють домішки впровадження (кисень, азот, вуглець, водень) і заміщення (залізо і кремній). Домішки підвищують міцність титану, але одночасно різко знижують пластичність, причому більше негативний вплив чинять домішки впровадження, особливо газу. При

введенні усього лише 0,003 % водню; 0,02 % азоту або 0,7 % кисню титан повністю втрачає здатність до пластичного деформування і крихко руйнується [5]. Особливо шкідливий водень, що знижує ударну в'язкість і викликає водневу крихкість титанових сплавів. Тому вміст домішок, передусім газів, в титані і його сплавах строго обмежують (табл. 1).

**Таблиця 1.** Хімічний склад деформуємих титанових сплавів (ГОСТ 19807-91)

| Марка  | Al          | V           | Mo          | Zr          | Mn          | Cr          | Si            | Fe          | O    | H     | N    | C    |
|--------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|-------------|------|-------|------|------|
| BT1-00 | -           | -           | -           | -           | -           | -           | 0,08          | 0,15        | 0,10 | 0,008 | 0,04 | 0,05 |
| BT1-0  | -           | -           | -           | -           | -           | -           | 0,10          | 0,25        | 0,20 | 0,010 | 0,04 | 0,07 |
| BT1-2  | -           | -           | -           | -           | -           | -           | 0,15          | 1,50        | 0,30 | 0,010 | 0,15 | 0,10 |
| OT4-0  | 0,4-<br>1,4 | -           | -           | 0,30        | 0,5-<br>1,3 | -           | 0,12          | 0,30        | 0,15 | 0,012 | 0,05 | 0,10 |
| OT4-1  | 1,5-<br>2,5 | -           | -           | 0,30        | 0,7-<br>2,0 | -           | 0,12          | 0,30        | 0,15 | 0,012 | 0,05 | 0,10 |
| OT4    | 3,5-<br>5,0 | -           | -           | 0,30        | 0,8-<br>2,0 | -           | 0,12          | 0,30        | 0,15 | 0,012 | 0,05 | 0,10 |
| BT5    | 4,5-<br>6,2 | 1,2         | 0,8         | 0,30        | -           | -           | 0,12          | 0,30        | 0,20 | 0,015 | 0,05 | 0,10 |
| BT5-1  | 4,3-<br>6,0 | 1,0         | -           | 0,30        | -           | -           | 0,12          | 0,30        | 0,15 | 0,015 | 0,05 | 0,10 |
| BT6    | 5,3-<br>6,8 | 3,5-<br>5,3 | -           | 0,30        | -           | -           | 0,10          | 0,60        | 0,20 | 0,015 | 0,05 | 0,10 |
| BT6с   | 5,3-<br>6,5 | 3,5-<br>4,5 | -           | 0,30        | -           | -           | 0,15          | 0,25        | 0,15 | 0,015 | 0,04 | 0,10 |
| BT3-1  | 5,5-<br>7,0 | -           | 2,0-<br>3,0 | 0,50        | -           | 0,8-<br>2,0 | 0,15-<br>0,40 | 0,2-<br>0,7 | 0,15 | 0,015 | 0,05 | 0,10 |
| BT-8   | 5,8-<br>7,0 | -           | 2,8-<br>3,8 | 0,50        | -           | -           | 0,20-<br>0,40 | 0,30        | 0,15 | 0,015 | 0,05 | 0,10 |
| BT9    | 5,8-<br>7,0 | -           | 2,8-<br>3,8 | 1,0-<br>2,0 | -           | -           | 0,20-<br>0,35 | 0,25        | 0,15 | 0,015 | 0,05 | 0,10 |
| BT14   | 3,5-<br>6,3 | 0,9-<br>1,9 | 2,5-<br>3,8 | 0,30        | -           | -           | 0,15          | 0,25        | 0,15 | 0,015 | 0,05 | 0,10 |
| BT20   | 5,5-<br>7,0 | 0,8-<br>2,5 | 0,5-<br>2,0 | 1,5-<br>2,5 | -           | -           | 0,15          | 0,25        | 0,15 | 0,015 | 0,05 | 0,10 |
| BT22   | 4,4-<br>5,7 | 4,0-<br>5,5 | 4,0-<br>2,5 | 0,30        | -           | 0,5-<br>1,5 | 0,15          | 0,5-<br>1,5 | 0,18 | 0,015 | 0,05 | 0,10 |
| ПТ-7М  | 1,8-<br>2,5 | -           | -           | 2,0-<br>3,0 | -           | -           | 0,12          | 0,25        | 0,15 | 0,006 | 0,04 | 0,10 |
| ПТ-3В  | 3,5-<br>5,0 | 1,2-<br>2,5 | -           | 0,30        | -           | -           | 0,12          | 0,25        | 0,15 | 0,006 | 0,04 | 0,10 |
| AT3    | 2,0-<br>3,5 | -           | -           | -           | -           | 0,2-<br>0,5 | 0,20-<br>0,40 | 0,2-<br>0,5 | 0,15 | 0,008 | 0,05 | 0,10 |

Примітки: 1. Основа – титан; сплав BT5-1 включає 2 – 3 мас. % Sn.

2. Сума інших домішок у всіх сплавах становить 0,30, в сплаві BT1-00 – 0,10 мас. %.

Завдання першої переплавки полягає у видаленні металу-відновника, його хлористої солі, водню і порівняно рівномірному розподіленні легуючих добавок. Якість поверхні зливка першої переплавки особливого значення не має [1]. Мета наступних переплавок полягає в підвищенні рівномірності розподілу легуючих добавок, формуванні зливків з однорідною структурою і хорошою поверхнею. В якості електроду, що витрачається, для першої переплавки використовують заготівку, що пресується з губки, титанових відходів і необхідної кількості легуючих компонентів. Заготівку діаметром 350...650 мм, завдовжки до 5500 мм отримують на спеціалізованих гідравлічних пресах зусиллям до 10000 ТБ [2].

### **Класифікація сплавів титану**

За змістом легуючих елементів і домішок сплави титану підрозділяють на ряд класів [87, 203]. Усі елементи, присутні в титані, відносяться до  $\alpha$ - або  $\beta$ - стабілізаторів і можуть бути згруповані за цією ознакою,  $\alpha$ -стабілізатори підвищують температуру поліморфного  $\beta \rightarrow \alpha + \beta$  перетворення і, як правило, мають обмежену розчинність як в  $\alpha$ -, так і  $\beta$ -модифікаціях титану. До групи  $\beta$ -стабілізаторів відносяться елементи, що знижують температуру  $\beta \rightarrow \alpha + \beta$ -перетворення і звужують область існування  $\alpha$ -фази. Різноманіття стабільних і нестабільних фаз, які є присутніми в сплавах титану залежно від виду і кількості легуючих елементів, умов і режимів механіко-термічної обробки, не дозволяє дати строгу структурну класифікацію, засновану на співвідношенні  $\alpha$ - і  $\beta$ -фаз. Тому в цій статті сплави згруповані по рівню механічних властивостей, які багато в чому залежать від способу виготовлення. В той же час є група жароміцних сплавів титану, додатково легуваних елементами, вступаючими з титаном в швидкоплинну евтектоїдну реакцію. Разом з  $\alpha$ - або  $\alpha + \beta$ - фазами в структурі таких сплавів є присутніми інтерметалеві з'єднання, наприклад Ti8Al. Багато промислових титанових сплавів, що деформуються, мають задовільні ливарні властивості. Вживані ливарні титанові сплави мають межу міцності  $\sigma_v$  від 850 до 950 МПа, проте межа витривалості у них на 40 – 60 % нижча, ніж у тих, що деформуються. Пластичність ливарних сплавів також знижена.

По рівню міцності титанові сплави, що деформуються, підрозділяються на сплави підвищеної пластичності ( $\sigma_v$  сплаву в відпаленому стані не більше 600 МПа) (табл. 2, 3), сплави середньої міцності ( $\sigma_v$  знаходиться в межах 600 – 1000 МПа) (табл. 5, 6) і високоміцні сплави ( $\sigma_v$  вища 1000 МПа) (табл. 7, 8). Тип структури (рівновісна, голчаста, "кошикового плетіння" та ін.) також істотно позначається на механічних властивостях титанових сплавів.

**Таблиця 2.** Механічні властивості напівфабрикатів титанових сплавів підвищеної пластичності при 293 К (ГОСТ 22178-76)

| Сплав (клас)              | Виріб                                     | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $a_n$ , кДж/м <sup>2</sup> | НВ, МПа   |
|---------------------------|---|------------------|----------------------|--------------|----------------------------|-----------|
| BT1-00 ( $\alpha$ )       | Прутки $d = 10-100$ мм                    | 300-450          | 180-300              | 25           | 1200                       | 1160-1500 |
| BT-1-0 ( $\alpha$ )       | Те ж, листи $h$ до 10 мм                  | 400-550          | ...                  | 20           | 1000                       | 1300-1600 |
|                           |   | 400-450          | 375                  | 20           | ...                        | ...       |
| BT1-1 ( $\alpha$ )        | Прутки $d = 30$ мм                        | 450-600          | ...                  | 25           | ...                        | 700       |
| BT2-2 ( $\alpha$ )        | Те ж                                      | 550-700          | ...                  | 20           | ...                        | 500       |
| OT4-0 (псевдо- $\alpha$ ) | Прутки $d = 10-100$ мм листи $h$ до 10 мм | 500-650          | ...                  | 20           | 700                        | 1560-2070 |
|                           |   | 500-650          | 500                  | 20           | ...                        | ...       |

**Таблиця 3.** Межа триваломіцності, повзучості і витривалості ( $10^7$  циклів) титанових сплавів підвищеної пластичності після відпалу

| Сплав  | Виріб  | $\Theta$ , К | $\sigma_{100}$ , МПа | $\sigma_{0,2/100}$ , МПа | $\sigma_{-1}$ , МПа |
|--------|--------|--------------|----------------------|--------------------------|---------------------|
| BT1-00 | Лист   | 293          | ...                  | ...                      | 160                 |
|        |        | 473          | ...                  | ...                      | 110                 |
| BT1-0  | Те ж   | 293          | ...                  | ...                      | 230                 |
|        |        | 673          | ...                  | ...                      | 150                 |
| OT4-0  | Прутки | 293          | ...                  | ...                      | 320                 |
|        |        | 573          | 340                  | 200                      | 220                 |

**Таблиця 4.** Механічні властивості титанових сплавів підвищеної пластичності після відпалу в залежності від температури

| Сплав  | Виріб  | $\Theta$ , К | $E$ , ГПа | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\varphi$ , % | $a_n$ , кДж/м <sup>2</sup> |
|--------|--------|--------------|-----------|------------------|----------------------|--------------|---------------|----------------------------|
| BT1-00 | Лист   | 20           | ...       | 1200             | 850                  | 10           | 40            | 800                        |
|        |        | 77           | ...       | 850              | 500                  | 15           | 50            | 1000                       |
|        |        | 293          | 110       | 400              | 270                  | 20           | 60            | 1200                       |
|        |        | 473          | 90        | 210              | 110                  | 20           | 60            | ...                        |
| BT1-0  | Прутки | 20           | ...       | 1200             | 1100                 | 10           | 35            | 600                        |
|        |        | 77           | ...       | 970              | 750                  | 20           | 48            | 800                        |
|        |        | 293          | 110       | 500              | 380                  | 30           | 55            | 1000                       |
|        |        | 473          | 90        | 300              | 210                  | 30           | 55            | ...                        |
| OT4-0  | Лист   | 293          | 115       | 550              | 500                  | 15           | 40            | 1000                       |
|        |        | 523          | 87        | 330              | 280                  | 20           | ...           | ...                        |
|        |        | 673          | ...       | 290              | 250                  | 10           | ...           | ...                        |

**Таблиця 5.** Механічні властивості напівфабрикатів титанових сплавів середньої міцності при 293 К (ГОСТ 22178-76, 23755-79)

| Сплав (клас)             | Виріб                  | ТО   | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $a_n$ , кДж/м <sup>2</sup> | НВ, МПа   |
|--------------------------|------------------------|------|------------------|----------------------|--------------|----------------------------|-----------|
| ОТ4 (псевдо- $\alpha$ )  | Лист, $h$ до 10 мм     | Отж. | 700-900          | 720                  | 12-20        | ...                        | ...       |
|                          | прутки $d = 10-100$ мм | ГК   | 700-900          | ...                  | 10-11        | 350-400                    | 2070-2850 |
| ВТ4 (псевдо- $\alpha$ )  | Лист, $h$ до 10 мм     | Отж. | 850-1050         | 750-900              | 10           | ...                        | ...       |
|                          | прутки $d = 10-100$ мм | Те ж | 850-1050         | ...                  | 10           | 350                        | 2410-3210 |
| ВТ5 ( $\alpha$ )         | Прутки $d = 10-100$ мм | «    | 750-950          | 720                  | 10           | 300                        | 2290-3210 |
| ВТ6 ( $\alpha+\beta$ )   | Лист $h = 1,0-10$ мм   | «    | 900-1100         | ...                  | 8,0          | ...                        | ...       |
| ВТ20 (псевдо- $\alpha$ ) | Те ж                   | «    | 950-1150         | 850-1050             | 8,0-12       | ...                        | ...       |
|                          | прутки $d = 25-100$ мм | ГК   | 950-1150         | ...                  | 10           | 400                        | 2250-3410 |

Примітки: ТО – термообробка; Отж. – відпал; ГК – гарячекатана.

**Таблиця 6.** Механічні властивості титанових сплавів середньої міцності після відпалу в залежності від температури

| Сплав | Виріб                        | $\Theta$ , К | $E$ , ГПа | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\varphi$ , % |
|-------|------------------------------|--------------|-----------|------------------|----------------------|--------------|---------------|
| ОТ4   | Лист<br>$h = 1,0-10$<br>мм   | 293          | 110       | 800              | 700                  | 28           | ...           |
|       |                              | 573          | 86        | 520              | 440                  | 29           | ...           |
|       |                              | 773          | 57        | 440              | 310                  | 29           | ...           |
| ВТ4   | Лист<br>$h = 1,0-4,0$<br>мм  | 293          | 110       | 1000             | 850                  | 20           | 34            |
|       |                              | 573          | ...       | 650              | 570                  | 19           | ...           |
|       |                              | 773          | ...       | 530              | 380                  | 25           | ...           |
| ВТ5   | Прутки<br>$d = 10-100$<br>мм | 77           | ...       | 1250             | 1150                 | 6,0          | 30            |
|       |                              | 203          | ...       | 900              | 850                  | 8,0          | 35            |
|       |                              | 293          | 125       | 750              | 720                  | 8,0          | 35            |
|       |                              | 573          | 110       | 500              | 450                  | 9,0          | 62            |
|       |                              | 673          | 105       | 470              | 400                  | 9,5          | 73            |
| ВТ6   | Те ж                         | 293          | 125       | 1000             | 900                  | 10           | 30            |
|       |                              | 523          | ...       | 750              | 600                  | 10           | 36            |
|       |                              | 723          | 97        | 650              | 450                  | 11           | 39            |

**Таблиця 7.** Механічні властивості напівфабрикатів високоміцних деформуємих титанових сплавів при 293 К

| Сплав (клас)            | Виріб                  | ТО   | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta_5$ , % | $a_H$ , кДж/м <sup>2</sup> | НВ, МПа   |
|-------------------------|------------------------|------|------------------|----------------------|----------------|----------------------------|-----------|
| BT14 ( $\alpha+\beta$ ) | Лист, $h = 0,6-10$ мм  | Отж. | 850-1070         | 850-980              | 8,0            | 600-1200                   | ...       |
| BT15 (псевдо- $\beta$ ) | Лист, $h = 1,0-4,0$ мм | З.   | 850-1000         | 650                  | 12             | 500-1000                   | 2700-2900 |
| BT16 ( $\alpha+\beta$ ) | Лист, $h = 1,0-10$ мм  | Отж. | 800-1000         | 780                  | 12             | 600                        | ...       |
| BT22 ( $\alpha+\beta$ ) | Прутки $d$ до 130 мм   | Те ж | 1100-1300        | 1100                 | 12             | 500                        | ...       |
| BT23 ( $\alpha+\beta$ ) | Лист $h = 1,5-10$ мм   | «    | 1100             | 1050                 | 8,0            | 1000-1200                  | 2550-2700 |

Примітки: ТО – термообробка; Отж. – відпал; З. – загартування.

**Таблиця 8.** Механічні властивості високоміцних титанових сплавів після термообробки в залежності від температури

| Сплав | Виріб                       | $\Theta$ , К | $E$ , ГПа | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\varphi$ , % |
|-------|-----------------------------|--------------|-----------|------------------|----------------------|--------------|---------------|
| BT14  | Лист<br>$h = 1,0-2,0$<br>мм | 203          | ...       | 1500             | 1350                 | 1,5-3,5      | ...           |
|       |                             | 293          | 110       | 1400             | 1300                 | 6,0-10       | ...           |
|       |                             | 623          | 89        | 950              | 750                  | 4,0-6,0      | ...           |
|       |                             | 773          | 67        | 750              | 600                  | 6,0-10       | ...           |
| BT15  | Лист,<br>прутки             | 293          | 110       | 900              | 850                  | 8,0          | ...           |
|       |                             | 573          | 100       | 700              | 650                  | 10           | ...           |
|       |                             | 773          | 75        | 650              | 450                  | 12           | ...           |
| BT16  | Лист<br>$h = 1,5$ мм        | 293          | 110       | 1330             | 1160                 | 7,0          | ...           |
|       |                             | 573          | 90        | 950              | 850                  | 8,0          | ...           |
|       |                             | 723          | 80        | 850              | 550                  | 9,0          | ...           |
| BT22  | Прутки<br>$d = 30$ мм       | 203          | ...       | 1350             | ...                  | 5,0-10       | 20-40         |
|       |                             | 293          | 110       | 1250             | 1150                 | 10-16        | 35-50         |
|       |                             | 573          | 95        | 950              | 850                  | 8,0-16       | 35-60         |
|       |                             | 673          | 85        | 900              | 900                  | 10-18        | 40-65         |

### Література

1. Металлургия титана / В.А.Гармата, Б.С.Гуляницкий, В.Ю.Крамник и др. – М.: Металлургия, 1967. – 643 с.
2. Плавка и литье титановых сплавов / Н.Ф.Аношкин, С.Г.Глазунов, Е.И.Морозов и др. – М.: Металлургия, 1978. – 383 с.
3. Механические свойства металлов и сплавов / Л.В.Тихонов, В.А.Кононенко, Г.И.Прокопенко, В.А.Рафалоаский. – К.: Наукова думка, 1985. – 583 с.