УДК 669.295

ПІДВИЩЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЛАВУ Т110 ШЛЯХОМ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ І ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБОК

П. Є. МАРКОВСЬКИЙ, О. Г. МОЛЯР

Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, Київ

Досліджено вплив термомеханічної обробки (ТМО), розробленої для двофазних α+β-титанових сплавів, на мікроструктуру та механічні характеристики нового титанового сплаву Т110. Особливість запропонованого методу в тому, що перед гарячою деформацією обробляють на β-твердий розчин при температурі однофазної β-області з подальшим охолодженням зі строго контрольованою швидкістю, внаслідок чого вдається усунути негативний вплив на кінцеву мікроструктуру вихідної грубої будови α-фази литого матеріалу і сформувати за наступної пластичної деформації при температурі на 50…70°C нижчій за температуру завершення поліморфного перетворення T_β в сплаві однорідну дисперсну мікроструктуру з наближеною до глобулярної будовою фаз. Завдяки цьому суттєво і одночасно підвищуються характеристики і міцності, і пластичності. Подальша зміцнювальна ТМО з дещо підвищеною температурою нагрівання під гартування забезпечила збільшення міцності до рекордного для стандартних (пічних) методів ТО значення (1366 МРа) за достатнього рівня пластичності. Подібний баланс міцності і пластичності є унікальний для титанових сплавів, що піддаються обробці з використанням стандартних (пічних) методів нагрівання.

Ключові слова: *високоміцні титанові сплави, міцність і пластичність, термомеханічна і термічна обробки.*

Сплави на основі титану – унікальний конструкційний матеріал для багатьох галузей, серед яких особливе місце займає авіакосмічне машинобудування, де найстрогіші вимоги до питомої міцності [1, 2]. Міцність титанових сплавів, окрім їх хімічного складу, задають певні фази і мікроструктура, які, в свою чергу, формуються, починаючи від виплавляння виливків до фінальної термічної обробки (ТО) готових виробів [2, 3]. Важливим структуротвірним чинником є термомеханічна обробка (ТМО), яка повністю відповідає за розмір β-зерен і кристалографічну текстуру та разом із ТО визначає морфологію і дисперсність внутрішньозеренної будови цих сплавів. Остаточні значення механічних і експлуатаційних характеристик титанових виробів також залежать від деяких специфічних властивостей, зокрема здатності до зварювання, яку визначає хімічний склад сплавів і яка досить часто не задовольняє вимоги конструкторів [4]. Враховуючи ці вимоги, співробітники Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України і ДП "АНТОНОВ" розробили новий титановий сплав Т110 (до 6 wt.% Al, 3,5...4,8 Nb, 0,3...0,8 Zr, 1,5...2,5 Fe, 0,8...1,8 Mo, 0,8...2,0 V, решта – Ti), який має поєднувати високу здатність до зварювання з таким балансом механічних характеристик, коли границя міцності зварюваних виробів в усіх зонах буде не нижче 110 kg/mm^2 [5, 6]. Загальний рівень його легованості, згідно зі загальноприйнятим співвідношенням [7], може за максимального вмісту β-стабілізаторів досягати 10,6 wt.% у

Контактна особа: О. Г. МОЛЯР, e-mail: molyar@imp.kiev.ua

молібденовому еквіваленті. Отже, застосовуючи оптимізовані режими термомеханічної і термічної обробок, можна отримати суттєво вищі, ніж заявлені авторами, механічні характеристики [8, 9]. Тому оцінювали потенціал підвищення механічних характеристик цього сплаву за оптимізації режимів ТМО і ТО.

Матеріал і методика. Випробовували плиту товщиною 12 mm зі сплаву Т110, отриманого методом електронно-променевого плавлення і вальцьованого на Науково-виробничому підприємстві "Титан" (НВП "Титан") при ІЕЗ ім. Є. О. Патона. Сплав мав такий хімічний склад: 5,2 wt.% Al, 3,6 Nb, 1,7 Fe, 0,9 Mo, 1,0 V, 0,4 Zr, решта – Ti, тобто вміст елементів, що стабілізували β-фазу, був мінімальний, через що молібденовий еквівалент становив всього 7,51 wt.%. З плити вирізали зразки розміром 10×12×60 mm, щоб дослідити мікроструктуру і фазовий склад, а також виконували ТО [10] і випробовували на розтяг у вихідному (див. таблицю, стан № 1) і термічно зміцненому (стан № 2) станах. З іншої її частини вирізали зразки розмірами 12×12×80 mm, які піддавали ТМО згідно з режимами, описаними раніше [8]. Вона полягала у попередній обробці на твердий β-розчин при 1000°C, 40 min, наступному контрольованому охолодженні і вальцюванні у профільних вальцях при температурі на 50...80°C нижчій за температуру завершення поліморфного перетворення (T_β) до діаметра 8 mm; загальна деформація тут 65%. Далі зразки відпалювали при 800°C упродовж 2 h (стан № 3). Частину їх термічно зміцнювали (стан № 4) у печі електроопору з повітряною атмосферою. Мікроструктуру сплаву досліджували металографічним методом на мікроскопі OLYMPUS IX70, фазовий склад – на дифрактометрі STADI, випробовували згідно зі стандартом ASTM E8M циліндричні зразки з діаметром 4 mm і довжиною робочої частини 25 mm на машині INSTRON-3376, використовуючи щонайменше три зразки кожного стану.

Механічні властивості сплаву Т110 у різних структурних станах

№ за/п	Стан (обробка)	$\sigma_{0,2}$, MPa	σ_B, MPa	$\delta_{uniform.}$, %	$\delta_{total.}$, %	ψ, %
1	Вихідний стан	896±12	958±14	8,4±0,5	18,4±0,8	56,0±8,2
2	Вихідний стан + + зміцнювальна ТО (850°C, 40 min, гартування у воді +550°C, 6 h)	1122±11	1205±12	3,5±0,4	9,0±0,7	32,9±7,8
3	ТМО (за режимом, розробленим у ІМФ) + + відпал 800°C, 2 h	1016±4,5	1075±0,5	10,67±0,2	21,56±0,4	58,5±0,1
4	ТМО за режимом № 3 + + термічне зміцнення (880°C, 40 min, гартування у воді +550°C, 6 h)	1294±0,0	1366±1,4	4,53±0,1	9,6±0,3	19,8±2,6

Результати та їх обговорення. Мікроструктурі сплаву після вальцювання, виконаного на НВП "Титан", властиві суттєво деформовані, але подрібнені під час вальцювання лише частково великі пластини α-фази в межах нерекристалізованих великих зерен β-фази, які утворилися ще під час кристалізації виливка (рис. 1*а*). Подібну мікроструктуру мають литі титанові двофазні α+β-сплави, деформовані при температурах верхньої частини α+β-області (дещо нижче температури завершення поліморфного перетворення T_β) зі ступенями деформації не

більше 60...70% [11, 12]. Такому мікроструктурному стану притаманний відносно низький рівень механічних характеристик (див. таблицю, п. 1), коли границя міцності σ_B не досягає 110 kg/mm^2 (1078 MPa). Зміцнювальна ТО як перший етап охоплювала нагрівання до температур верхньої частини двофазної α+β-області і гартування, що не дає можливості принципово змінити мікроструктуру сплаву. Після остаточного старіння виявлено великі первинні частки пластинчастої α-фази (її кількість досягає ~45%), між якими знаходиться відповідальна за ефект зміцнення дисперсна суміш α+β-фаз (рис. 1*b*). Через невелику частку другого структурного складника в загальному об'ємі матеріалу (~55%) вдалося підвищити міцність лише на 247 MPa проти вихідного деформованого стану, а несприятлива пластинчаста морфологія первинної α-фази і великий розмір β-зерен призвели до відносно низьких показників пластичності (п. 2 у таблиці).

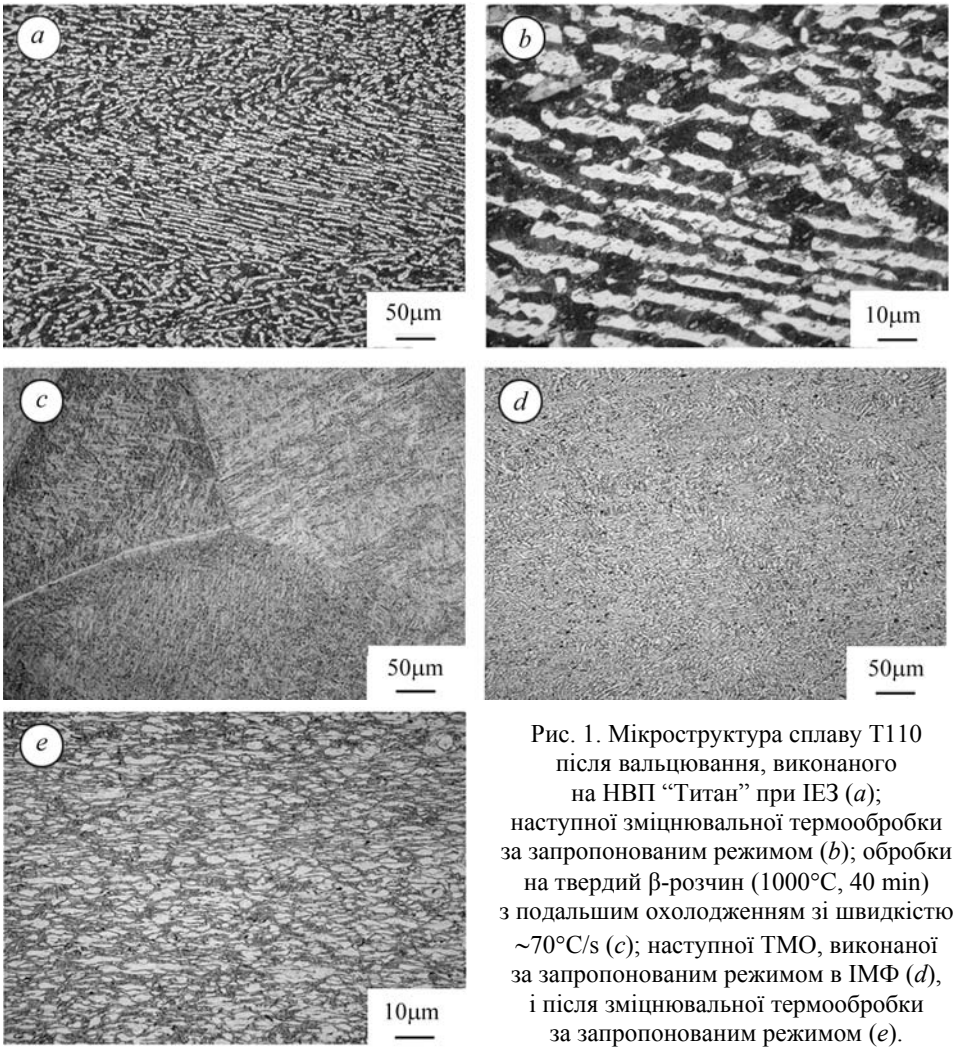

Рис. 1. Мікроструктура сплаву Т110 після вальцювання, виконаного на НВП "Титан" при ІЕЗ (*a*); наступної зміцнювальної термообробки за запропонованим режимом (*b*); обробки на твердий β-розчин (1000°С, 40 min) з подальшим охолодженням зі швидкістю ~70°С/s (*c*); наступної ТМО, виконаної за запропонованим режимом в ІМФ (*d*), і після зміцнювальної термообробки за запропонованим режимом (*e*).

Fig. 1. Microstructure of T110 alloy after casting and rolling performed at SPC "Titan" of E. O. Paton Institute for Electric Welding, NASU (*a*); additional thermal strengthening by the proposed conditions (*b*); additional β-solid solution treatment (1000°C, 40 min), followed by cooling with a rate of ~70°C/s (*c*); thermomechanical processing (880°C with 65% reduction), proposed by IMPh NASU (*d*); and after thermal strengthening by the proposed condition (*e*).

Відомо [2, 3], що для підвищення характеристик міцності і пластичності титанових сплавів потрібна одночасна трансформація пластинчастої α-фази в глобулярну та рекристалізація β-зерен з утворенням α+β-мікроструктури рівновісного типу. Якщо за вихідний стан використовувати грубозернисту пластинчасту мікроструктуру литого матеріалу, цього можна досягнути тільки багатостадійною ТМО зі загальною пластичною деформацією понад 80%. Інтенсифікувати трансформацію подібної вихідної мікроструктури в глобулярну можна за розробленим у ІМФ НАН України підходом [8]: обробка на β-твердий розчин при температурах однофазної β-області. Так вдається розчинити масивну пластинчасту α-фазу і усунути негативний вплив вихідної мікроструктури. Подальше контрольоване охолодження зі швидкістю ~70°C/s внаслідок розпаду високотемпературної метастабільної β-фази за особливим механізмом, коли мартенситне перетворення протікає з частковою участю дифузійних процесів перерозподілу легувальних елементів [13], призводить до формування високодисперсної α′+α″-мікроструктури, яка не успадковує морфології будови фаз вихідного стану (див. рис. 1*a* і *c*). Подальша ТМО при 800°C із загальним ступенем деформації всього 65% зумовила дисперснішу і одноріднішу мікроструктуру, більш наближену до рівновісної (рис. 1*d*). Подібна трансформація мікроструктури сплаву дала можливість одночасно підвищити і характеристики міцності (на 120 MPa), і пластичності порівняно з вихідним станом (порівняй пп. 3 і 1 у таблиці). Зауважимо, що кращий результат можна було б отримати за більшого ступеня деформації, але в нашому випадку вона обмежена 65% через недостатню товщину вихідної плити.

Температура нагрівання сплаву під гартування (850°C), обрана авторами з міркувань мінімального зниження характеристик пластичності, є занадто віддалена від його температури T_β. Наслідком цього є відносно велика частка не задіяної у термозміцненні залишкової первинної α-фази і, як результат, порівняно невеликий приріст міцності. Оскільки після ТМО сплав мав більший "запас пластичності", застосували температуру нагрівання під гартування, ближчу до T_β (880°C), через що вдалося зменшити вміст частки первинної α-фази до ~35%. Завдяки цьому границя міцності підвищилась до 1366 MPa за цілком достатньої пластичності. Слід також зауважити, що внаслідок такої зміцнювальної термообробки границю міцності підвищили на 291 MPa порівняно з деформованим і відпаленим станами (п. 4 проти п. 3 у таблиці), у той час як стандартна ТО забезпечила приріст 247 MPa за фактично однакової пластичності (п. 2 проти п. 1). Приріст міцності вихідного сплаву (п. 1 у таблиці) після ТО становив 408 MPa, причому як абсолютне значення міцності, так і її приріст – надзвичайно високий результат для титанових сплавів після стандартної (пічної) зміцнювальної ТО [1–3].

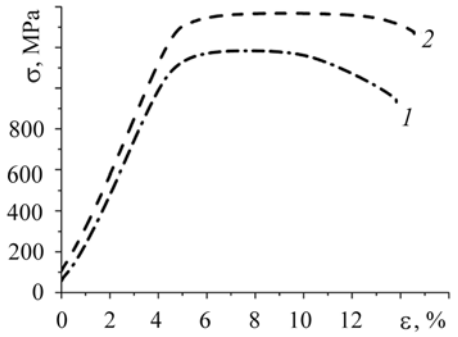

Рис. 2. Типові інженерні криві розтягу зразків сплаву Т110 після термозміцнення: *1*, *2* – у станах № 2 і 4 (див. таблицю).

Fig. 2. Typical engineering stress-strain curves for thermal hardened specimens of T110 alloy: *1*, *2* – conditions № 2 and 4 (see the Table).

Порівнянням інженерних кривих розтягу зразків, підданих термозміцненню (рис. 2), встановлено, що сплав після запропонованих режимів ТМО і ТО не тіль-

ки має вищі міцнісні параметри, але й у ньому однорідніша пластична деформація в усьому діапазоні напружень, тобто менш схильний до її локалізації, ніж матеріал після стандартної обробки. Запропоновані режими ТМО і зміцнювальна ТО не тільки істотно підвищують міцність і пластичність проти застосованих виробниками сплаву обробок, але й суттєво, інколи навіть на порядок, зменшують статистичний розкид їх значень. Раніше [8] це пояснювали формуванням як дисперснішої, так і одноріднішої за розмірами фазових складників мікроструктури.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що, оптимізуючи режими термомеханічної і термічної обробок, можна суттєво поліпшити мікроструктуру і механічні характеристики нового титанового сплаву Т110. Запропонована ТМО охоплює попередню обробку на твердий β-розчин при температурах однофазної β-області з подальшим контрольованим охолодженням з певною швидкістю, що дає можливість усунути негативний вплив грубої вихідної мікроструктури виливки і за подальшої гарячої пластичної деформації сформувати у сплаві наближену до глобулярної однорідну дисперсну мікроструктуру. Наслідком цього є одночасне суттєве підвищення характеристик і міцності, і пластичності. Завдяки цьому вдається під час наступної термообробки максимально наблизити температуру нагрівання під гартування до температури завершення поліморфного перетворення, а отже, досягти після остаточного старіння надзвичайно високої міцності (σ_B = 1366 MPa) за достатніх характеристик пластичності. Особливістю отриманих після оптимізованих ТМО і ТО мікроструктурних станів є мінімальний статистичний розкид значень механічних характеристик.

РЕЗЮМЕ. Исследовано влияние термомеханической обработки (ТМО), разработанной для двухфазных α+β-титановых сплавов, на микроструктуру и механические свойства нового сплава Т110. Особенность такого подхода в том, что перед горячей пластической деформацией сплав обрабатывают на β-твердый раствор при температуре однофазной β-области с последующим охлаждением со строго контролируемой скоростью, вследствие чего устраняется воздействие исходной грубой пластинчатой структуры α-фазы. Показано, что благодаря последующей ТМО при температуре на 50…70°С ниже температуры завершения полиморфного превращения T_β в сплаве формируется однородная дисперсная микроструктура с близким к равноосному строением фаз, вследствие чего удается существенно повысить как прочностные, так и пластические характеристики сплава. Последующая упрочняющая термообработка с более высокой температурой нагрева под закалку обеспечила повышение прочности до рекордного для стандартных печных методов нагрева значения (1366 MPa) при достаточном уровне пластических свойств. Подобный баланс прочности и пластичности является уникальным для титановых сплавов, подвергнутых обработке с использованием стандартных (печных) методов нагрева.

SUMMARY. The influence of thermo-mechanical processing previously developed for two-phase α+β-titanium alloys on the T110 alloy microstructure and mechanical properties is studied. A specific feature of this approach consists in solid solution treatment at a temperature of single-phase β-field with subsequent cooling with a strongly controlled rate. This preliminary treatment resulted in elimination of the negative influence of the initial coarse laminar microstructure of the α-phase. It is shown that owing to such optimal thermo-mechanical treatment (at a temperature lower by 50…70°C of the performed polymorphous T_β transformation) a disperse inhomogeneous structure with a phase structure close to the equiaxial phase structure is formed. As a result the strength and plasticity characteristics of the alloy are significantly improved. Additional hardening (STA) heat treatment, which includes solid solutioning before quenching at a temperature very close to β-transus, ensured the increase in the ultimate tensile strength up to 1366 MPa that is accompanied by the sufficient level of plasticity. Such a balance of strength and plasticity is unique for titanium alloys heat treated with the conventional (furnace) methods of heating.

1. *Цвиккер У.* Титан и его сплавы. – М.: Металлургия, 1979. – 512 с.
2. *Lutjering G. and Williams J. C.* Titanium. – Berlin: Springer, 2003. – 289 p.
3. *Металлография* титановых сплавов / Е. А. Борисова, Г. А. Бочвар, М. Я. Брун и др. – М.: Металлургия. 1980. – 464 с.
4. *Лясоцкая В. С.* Термическая обработка сварных соединений титановых сплавов. – М.: Металлургия, 2003. – 352 с.
5. *Утомне* руйнування зварних зразків зі сплаву Т110 / Є. В. Аболіхіна, С. Л. Антонюк, О. Г. Моляр, В. М. Замков // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – № 4. – С. 89–91.
   (*Abolikhina E. V., Antonyuk S. L., Molyar A. G., and Zamkov V. N.* Fatigue Fracture of Welded Specimens Made of T110 Alloy // Materials Science. – 2004. – № 4. – P. 535–538.)
6. *Патент* України № 40087. Високоміцний титановий сплав / В. М. Замков, В. П. Топольский, М. П. Тригуб та ін. – Опубл. 16.06.2003 в бюл. "Промислова власність". – 2003. – № 6.
7. *Bania P. J.* Beta Titanium Alloys and their Role in the Titanium Industry // Beta Titanium Alloys in the 90's. – TMS Publications, Warrendale, PA, 1993. – P. 3–14.
8. *Патент* України № 22693. Спосіб термомеханічної обробки високоміцних титанових сплавів / О. М. Івасишин, П. Е. Марковський, О. Г. Моляр, Ю. В. Матвійчук. – Опубл. 13.12.2006 в бюл. "Промислова власність". – 2007. – № 5.
9. *Марковский П. Е.* Высокопрочные структурные состояния в титановых сплавах, подвергнутых интенсивному термическому воздействию (обзор) // Металлофизика и новейшие технологии. – 2009. – № 4. – С. 511–535.
10. *Упрочняющая* термическая обработка, механические характеристики и структура свариваемого высокопрочного титанового сплава Т110 / В. Н. Замков, В. Ф. Топольский, В. А. Трофимов и др. // "Титан-2005 в СНГ". – К.: Изд. ИМФ НАН Украины, 2005. – С. 198–208.
11. *Semiatin S. L. , Seetharaman V., and Weiss I.* The thermomechanical processing of alpha/ beta titanium alloys // J. of Metals. – 1996. – № 6. – P. 33–39.
12. *Microstructure*, Texture, and Mechanical Properties of Electron-Beam Melted Ti–6Al–4V / A. N. Kalinyuk, N. P. Trigub, V. N. Zamkov et al. // Mater. Sci. & Engng. – 2003. – № 1–2. – P. 1781–88.
13. *Роль* скорости охлаждения в формировании структуры титановых сплавов, термоупрочненных с неполной гомогенизацией β-фазы / В. Н. Гриднев, О. М. Ивасишин, П. Е. Марковский, В. Л. Свечников // Металлофизика. – 1985. – № 3. – С. 37–44.

Одержано 01.02.2012