



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

УДК 669.187.526

А.В. ШИЯН, канд. физ.-мат. наук

старший научный сотрудник отдела физики прочности и разрушения¹

E-mail: shyian_av@ukr.net

Ю.Я. МЕШКОВ, член-корр. НАН Украины, д-р техн. наук

главный научный сотрудник отдела физики прочности и разрушения¹

E-mail: meshkov100@gmail.com

Д.Г. САВВАКИН, д-р физ.-мат. наук

ведущий научный сотрудник отдела физики прочности и пластичности неомогенных сплавов¹

E-mail: savva@imp.kiev.ua

¹Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, г. Киев, Украина

Поступила в редакцию 30.06.2015.

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ НА ВЗАИМОСВЯЗЬ ХАРАКТЕРИСТИК ИХ ПЛАСТИЧНОСТИ, ПРОЧНОСТИ И МЕХАНИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ

Сформулированы представления о двух видах поведения механических характеристик конструктивных титановых сплавов в системе взаимосвязи «пластичность — прочность — механическая стабильность». Показано, что при одинаковых значениях прочности $\sigma_{0,2}$ и механической стабильности K_{ms} видовая принадлежность сплавов обуславливается уровнем их пластичности: к первому виду относятся сплавы с повышенным, а ко второму — со сниженным уровнем ψ_K . Установлено, что на видовую принадлежность титановых сплавов, полученных с помощью технологий порошковой металлургии, основное влияние оказывает размер зерна и объемное содержание пор, при этом увеличение размера зерен и повышение пористости приводит к резкому снижению пластических свойств сплава, что может стать причиной изменения вида поведения их механических характеристик. Видовая принадлежность оказывает решающее влияние на степень склонности сплава к его охрупчиванию под действием таких факторов, как низкие температуры и концентраторы напряжений (трещины, надрезы и т. п.).

Ключевые слова: механическая стабильность, обобщенная диаграмма, вид поведения механических характеристик, видовая принадлежность

Введение. В работах [1, 2] показано, что свойство механической стабильности, как уникальная способность материала проявлять упруго-пластическую форму поведения под действием нагрузки, можно рассматривать в качестве важнейшего механического свойства металлических материалов, имеющего не менее фундаментальное значение, чем привычные свойства прочности и пластичности. В количественной форме характеристику механической стабильности K_{ms} определяют, используя зависимость [1, 2]:

$$K_{ms} = R_x / \sigma_2 = R_x / (\sigma_{0,2} \cdot 10^n), \quad (1)$$

где R_x — хрупкая прочность (для конструктивных сталей (КС) — сопротивление микросколу R_{MC} [1]) — напряжение разрушения образца при предельной деформации $\epsilon_c \approx 2\%$ в состоянии перехода из пластического состояния в хрупкое при одноосном растяжении в криогенной области температур; σ_2 — текущая прочность металла на этапе деформации, равной критической $\epsilon_c \approx 2\%$; $\sigma_{0,2}$ — условный предел текучести; n — показатель деформационного упрочнения.

Оптимизация, т. е. поиск наилучших соотношений механических характеристик металлических сплавов, является ключевым этапом оценки

их механического качества в условиях линейно-напряженно-деформированного состояния (НДС) и конструкционного качества в условиях концентрации напряжений [1].

Для конструктивных титановых сплавов (КТС) взаимосвязь свойств «пластичность — прочность — механическая стабильность» была установлена в [3], а их оптимизация проведена в [4, 5]. В указанных работах на основе экспериментальных данных, было показано, что уравнения регрессии, описывающие зависимость пластичности (ψ_K) от прочности ($\sigma_{0,2}$) при условии постоянства механической стабильности K_{ms} , имеют параболический характер и их можно аппроксимировать параболическими функциями:

$$\psi_K = a_{1,2} \pm b_{1,2} \cdot \sigma_{0,2} \mp c_{1,2} \cdot \sigma_{0,2}^2, \quad (2)$$

где ψ_K — в процентах, %; $\sigma_{0,2}$ — в МПа; $a_{1,2}$, $b_{1,2}$, $c_{1,2}$ — эмпирические коэффициенты.

Проведенный анализ показал, что при этом их можно разделить на два вида поведения механических характеристик:

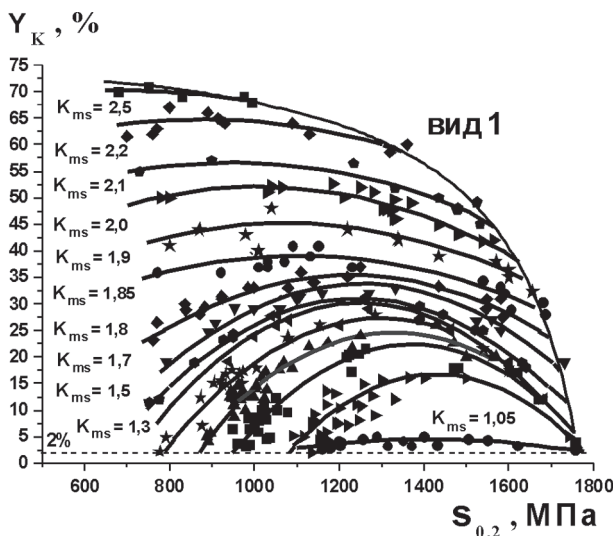
- параболы, обращенные выпуклостью вверх и характеризующиеся возрастанием характеристики пластичности ψ_K с увеличением прочности $\sigma_{0,2}$ до максимального значения (максимума) $\psi_K^{\text{макс.}}$ и последующим ее убыванием при дальнейшем повышении $\sigma_{0,2}$, далее по тексту — выпуклые зависимости $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$ при $K_{ms} = \text{const}$ вида 1, у которых коэффициенты в (2): $b_1 > 0$; $c_1 < 0$;
- параболы, обращенные вогнутостью вверх и, наоборот, характеризующиеся убыванием характеристики пластичности ψ_K с увеличением прочности $\sigma_{0,2}$ до минимального значения (минимума) $\psi_K^{\text{мин.}}$ и последующим ее возрастанием при дальнейшем повышении $\sigma_{0,2}$, далее по тексту — вогнутые зависимости $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$ при $K_{ms} = \text{const}$ вида 2, у которых коэффициенты в (2): $b_2 < 0$; $c_2 > 0$.

При этом в [1] было установлено, что принадлежность к определенному виду поведения механических характеристик сплава оказывает решающее влияние на его склонность к охрупчиванию под действием различных охрупчивающих факторов (низкие температуры, концентраторы напряжений и т. п.).

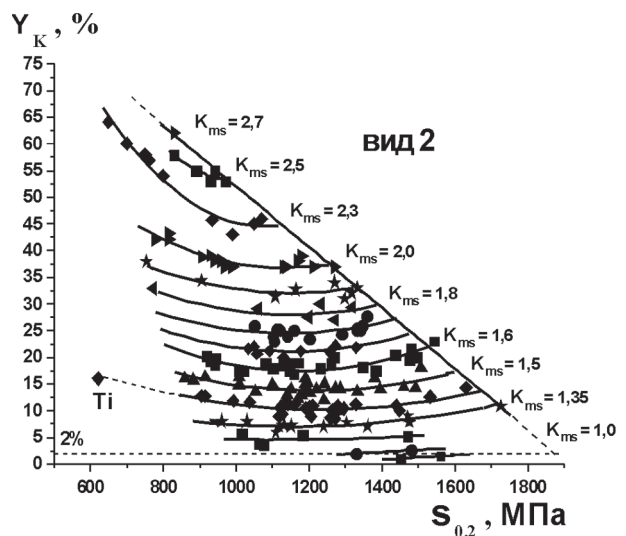
На основе объединения зависимостей $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$ при различных фиксированных значениях K_{ms} в [1, 3–5] была построена обобщенная диаграмма системы взаимосвязи свойств «пластичность — прочность — механическая стабильность», отражающая запас пластичности, достаточный для защиты КТС от охрупчивания, в зависимости от их прочности при заданном уровне механической стабильности (рисунок 1).

Однако полученные в [1, 3–5] закономерности согласованного изменения прочностных ($\sigma_{0,2}$) и пластических (ψ_K) свойств КТС при фиксированном уровне характеристики механической стабильности ($K_{ms} = \text{const}$) требуют дальнейшего более детального исследования и ответа на ряд связанных с ними вопросов, в частности, о влиянии структурного состояния сплавов одного и того же класса прочности $\sigma_{0,2}$ на причины различного поведения их пластических свойств (по показателю пластичности ψ_K) на одних и тех же уровнях K_{ms} , а, следовательно, и на причины разделения КТС на два разных вида.

Информация о влиянии структурного состояния КТС на вид поведения механических характеристик важна для эффективного планирования технологического поиска на основе нескольких предварительных проб. Используя эту информацию, можно составить технологическую карту [1], которая поможет на практике выбрать, заказать или создать сплав с заданной ключевой характеристикой



а



б

Рисунок 1 — Обобщенная диаграмма для КТС при заданных уровнях механической стабильности K_{ms} [1, 3–5]:
а — зависимости пластичности ψ_K от прочности $\sigma_{0,2}$ 1-го вида (выпуклые); б — те же зависимости 2-го вида (вогнутые);
темные знаки — экспериментальные данные

в системе взаимосвязи свойств «пластичность — прочность — механическая стабильность» и обеспечить благодаря этому достижение желаемого механического качества металла [6].

Таким образом, *целью настоящей работы* является изучение влияния структуры конструктивных титановых сплавов, имеющих одинаковый уровень прочности $\sigma_{0,2}$ и механической стабильности K_{ms} , на поведение показателя их пластичности ψ_K в системе взаимосвязи свойств «пластичность — прочность — механическая стабильность».

Исследуемые материалы. Для исследований использовали два КТС Ti-10V-2Fe-3Al [7] и Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr [8] (состав в массовых %), изготовленных с помощью технологий порошковой металлургии [9]. Сплавы получены из порошковых смесей на основе наводороженного титана с добавками соответствующих лигатур путем прессования смесей при комнатной температуре в пресс-формах и последующего вакуумного спекания при 1250–1350 °С. Пористость полученных сплавов определяли с точностью $\pm 0,3$ % путем оценки их плотности методом гидростатического взвешивания и дополнительно контролировали численным анализом изображений поверхностей металлографических шлифов. Средний размер зерна с точностью ± 8 мкм определяли методом секущих, используя оптические изображения микроструктуры. Сплавы находились в различных структурных состояниях после специальных термических обработок (ТО) и принадлежали к различным видам поведения механических характеристик в системе взаимосвязи свойств «пластичность — прочность — механическая стабильность». Механические свойства определяли по результатам испытаний на одноосное квазистатическое растяжение гладких цилиндрических образцов при комнатной температуре (293 К). Испытания проводили на машине INSTRON 8802 с постоянной скоростью перемещения активного захвата 2 мм/мин. Исследуемые КТС были разделены на два вида согласно методики [5] по результатам экспериментального определения величин пластичности ψ_K и прочности $\sigma_{0,2}$, а также расчета величины характеристики механической стабильности K_{ms} согласно методики [10].

Результаты исследований. Результаты определения базовых механических характеристик пластичности ψ_K , прочности $\sigma_{0,2}$, механической стабиль-

ности K_{ms} и видовой принадлежности для исследованных КТС представлены в таблице.

Результаты исследования микроструктуры исследованных КТС, относящихся к различным видам поведения механических характеристик в системе взаимосвязи «пластичность — прочность — механическая стабильность», представлены на рисунке 2.

Обсуждение результатов. Расположение исследованных КТС на обобщенной диаграмме системы взаимосвязи свойств «пластичность — прочность — механическая стабильность» (рисунок 1) представлено на рисунке 3. Из этого рисунка видно, что причиной разделения каждого сплава, имеющего примерно одинаковый уровень прочности $\sigma_{0,2}$ и механической стабильности K_{ms} при различных режимах ТО, на два вида поведения механических характеристик (см. таблицу), является величина показателя пластичности ψ_K .

Приведенные в таблице (№№ 1, 2) состояния сплава Ti-10V-2Fe-3Al получены синтезом (спеканием гетерогенных порошковых смесей) при температуре 1250 °С, что соответствует однофазной β -области твердого раствора. В процессе последующего печного охлаждения до комнатной температуры в материале происходит диффузионное выделение α -фазы, что формирует двухфазную $\alpha + \beta$ микроструктуру сплава по данным рентгеновского анализа.

Данный сплав характеризуется наличием быстродиффундирующего в титане железа, что приводит к достаточно быстрой кинетике распада высокотемпературной β -фазы и росту выделений α -фазы. Термокинетические условия охлаждения в печи приводят к формированию достаточно крупных пластинчатых выделений α -фазы уже в процессе охлаждения (см. рисунок 2 а, б). Дополнительная выдержка при 800 °С (таблица, № 2) была сделана с целью укрупнить выделения α -фазы и добиться получения более стабильного $\alpha + \beta$ состояния, однако, с применением такой выдержки внутризеренная структура практически не изменилась. Оба состояния этого сплава, благодаря сходным условиям синтеза, имеют близкие по размерам зерна (105 мкм и 118 мкм, см. рисунок 2 а, б соответственно) и аналогичную крупность выделений α -фазы (толщина пластин порядка 1 мкм), заметно отличаясь лишь объемной долей пор (№ 1—3 %, № 2—4,7 % пор по данным гидростатического взвешивания). Достаточно крупные выделения а-

Таблица — Значения базовых механических свойств ψ_K , $\sigma_{0,2}$, K_{ms} и результаты определения видовой принадлежности исследованных КТС

№ п/п	КТС	Технология получения	ψ_K , %	$\sigma_{0,2}$, МПа	K_{ms} [8]	Вид
1	Ti-10V-2Fe-3Al	1250 °С, 4 ч	17,3	974	1,18	1
2		1250 °С, 4 ч + 800 °С, 1 ч	3,5	989	1,18	2
3	Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr	1350 °С, 4 ч + 850 °С, 1 ч + 750 °С, 1 ч	17,0	1018	1,16	1
4		1350 °С, 4 ч + 750 °С, 1 ч	3,9	1007	1,16	2

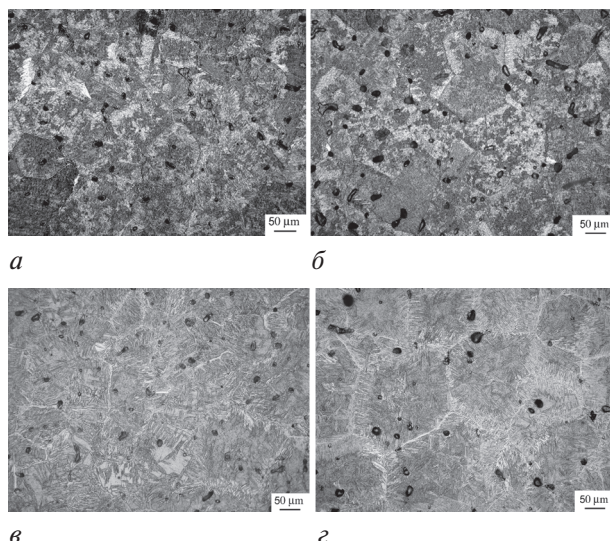


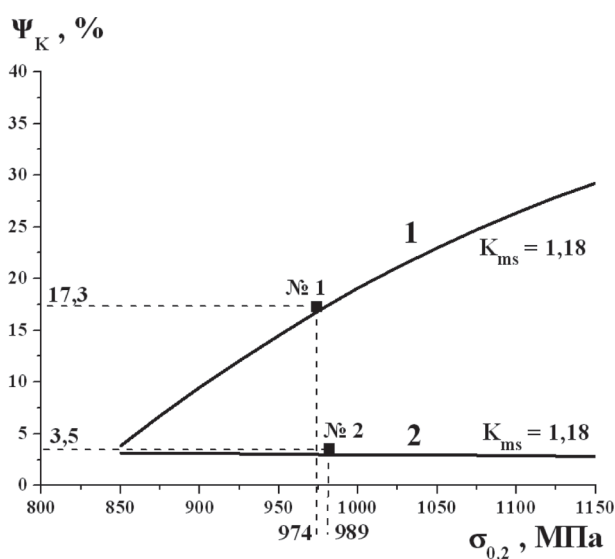
Рисунок 2 — Типичные микроструктуры сплавов Ti-10V-2Fe-3Al (а — № 1, б — № 2 в таблице) и Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr (в — № 3, з — № 4 в таблице)

фазы (толщиной 1 мкм) приводят к относительно невысокому уровню прочности сплава, при котором негативное влияние пор на снижение пластических свойств не столь заметно. Лишь при увеличении объемного содержания пор до 4,7 % и размеров зерна до 118 мкм (состояние № 2) пластичность ψ_K резко снижается, что приводит к различной видовой принадлежности для каждой из ТО этого сплава. При этом сплав № 1 (см. таблицу) принадлежит к 1-му виду, который характеризуется повышенной пластичностью ψ_K на данных уровнях прочности $\sigma_{0,2}$ и механической стабильности K_{ms} , а № 2 — ко 2-му виду, для которого характерны более низкие уровни ψ_K при тех же значениях $\sigma_{0,2}$ и K_{ms} (см. рисунок 3 а).

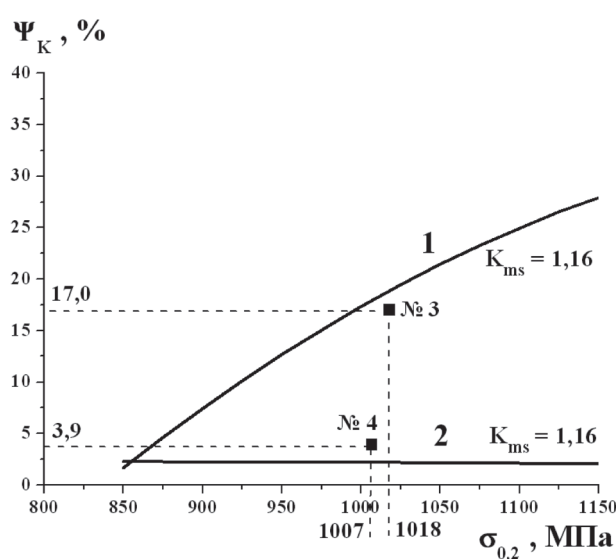
Химический состав сплава Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr приводит к заметно более медленному распаду вы-

сокотемпературной β -фазы при охлаждении от температур синтеза. Поэтому в процессе охлаждения хотя и успевает сформироваться двухфазное $\alpha + \beta$ состояние, но с относительно малым количеством выделившейся α -фазы. При этом размеры сформировавшихся выделений α -фазы достаточно дисперсные (пластины толщиной порядка 0,1 мкм), что значительно повышает прочность такого материала (до 1000 МПа и выше) при одновременном катастрофическом падении пластических характеристик. Для получения микроструктуры, обеспечивающей сбалансированные характеристики прочности и пластичности, материал выдерживали в процессе охлаждения при 850 и 750 °С для выделения и укрупнения α составляющих. Такая микроструктура, все еще имея достаточно высокий уровень прочности (№№ 3, 4, см. таблицу), в то же время позволяет достичь приемлемого уровня пластичности. Однако, материалы (№№ 3, 4) были получены из разных исходных порошков, что, при аналогичных термических режимах синтеза, проявилось в различных размерах зерен и пористости полученного сплава Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr. Сплав (№ 3, см. рисунок 2 в) имеет достаточно малые размеры зерен (102 мкм) и около 2% пор, в то время как материал (№ 4, см. рисунок 2 з) имеет такие негативные микроструктурные характеристики как относительно большие зерна (160 мкм) и более 3% пор. Эти особенности микроструктуры материала (№ 4, см. таблицу) заметно снижают его пластические свойства по показателю ψ_K , слабо влияя на прочность $\sigma_{0,2}$ и механическую стабильность K_{ms} . Соответственно, сплав с более высокой пластичностью ψ_K (№ 3, см. таблицу) принадлежит к 1-му виду, α (№ 4, см. таблицу) — ко 2-му виду (см. рисунок 3 б).

Выводы. 1. На принадлежность конструкционных титановых сплавов к различным видам поведе-



а



б

Рисунок 3 — Зависимости пластичности ψ_K от прочности $\sigma_{0,2}$ при одинаковых уровнях механической стабильности K_{ms} для разных видов поведения механических характеристик КТС: 1 — вид 1; 2 — вид 2; а — сплав Ti-10V-2Fe-3Al; б — сплав Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr; ■ — экспериментальные данные; №№ — сплавы и режимы ТО в таблице

ния механических характеристик в системе взаимосвязи «пластичность — прочность — механическая стабильность» ключевую роль играют режимы их термической обработки, обеспечивающие величины этих механических характеристик. При одинаковых значениях прочности $\sigma_{0,2}$ и механической стабильности K_{ms} сплава видовой принадлежность обуславливает уровень пластичности ψ_K : высокий характерен для 1-го вида, а низкий — для 2-го.

2. На величину уровня пластичности ψ_K титановых сплавов, полученных с помощью технологий порошковой металлургии, основное влияние оказывает размер зерна и объемное содержание пор. Увеличение размера зерен и повышение пористости приводит к резкому снижению пластических свойств сплава, что может стать причиной изменения его видовой принадлежности.

Список условных обозначений:

НДС — напряженно-деформированное состояние;
КТС — конструкционные титановые сплавы;
ТО — термическая обработка.

Список литературы

1. Мешков, Ю.Я. Механическая стабильность металлов и сплавов / Ю.Я. Мешков, С.А. Котречко, А.В. Шиян. — Киев: Наук. думка, 2014. — 278 с.
2. Мешков, Ю.Я. Проблема хрупкости конструкций // Механика машин, механизмов и материалов / Ю.Я. Мешков, А.В. Шиян. — 2015. — № 1(30). — С. 30–36.
3. Шиян, А.В. Взаимосвязь свойств прочности, пластичности и механической стабильности конструкционных титановых сплавов / А.В. Шиян, Ю.Я. Мешков // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2014. — № 4. — С. 54–75.
4. Оптимизация свойств прочности, пластичности и механической стабильности конструкционных титановых сплавов / О.М. Ивасишин [и др.] // сб. науч. тр. междунар. конф. «Ti-2013 в СНГ», Украина, г. Донецк, 2013. — Киев: РИО ИМФ им. Г. В. Курдюмова НАН Украины. — С. 297–306.
5. Способ определения оптимального соотношения пластичности, прочности и механической стабильности конструкционных металлических сплавов: пат. 103814 Украина: МПК 13, G01N, № 3/00, 3/18 / О.М. Ивасишин, П.Е. Марковский, Ю.В. Матвийчук, С.А. Котречко, Ю.Я. Мешков, А.В. Шиян, Н.Н. Стеценко // Промышленная собственность. — 2013. — Бюл. № 22.
6. Шиян, А.В. Оценка механического качества конструкционных титановых сплавов по их способности сопротивляться охрупчиванию при одноосном растяжении / А.В. Шиян, Ю.Я. Мешков // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2015. — № 1. — С. 5–26.
7. Микроструктура и свойства сплава Ti-10V-2Fe-3Al, синтезированного методом порошковой металлургии / О.М. Ивасишин [и др.] // Технология легких сплавов. — 2009. — № 2. — С. 70–76.
8. Влияние способа легирования на микроструктуру и свойства сплава Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr, синтезированного методом смесей порошковых компонент / О.М. Ивасишин [и др.] // Научные вести НТУУ КПИ. — 2009. — № 4. — С. 79–84.
9. Ivasishin, O.M. The Impact of Diffusion on Synthesis of High-Strength Titanium Alloys from Elemental Powder Blends / O.M. Ivasishin, D.G. Savvakina // Key Engineering Materials. — 2010. — Vol. 436. — Pp. 113–121.
10. Связь характеристик «хрупкой» прочности и механической стабильности с базовыми механическими характеристиками конструкционных титановых сплавов / О.М. Ивасишин [и др.] // Металлофизика и новейшие технологии. — 2013. — 35, № 4. — С. 479–496.

SHYIAN Artur V., Cand. Phys.-Math. Sc.

Senior Researcher of the Department of Physics of Strength and Fracture¹

E-mail: shyian_av@ukr.net

MESHKOV Yuriy Ya., Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Dr. Techn. Sc.

Chief Researcher of the Department of Physics of Strength and Fracture¹

E-mail: meshkov100@gmail.com

SAVVAKIN Dmitriy G., Dr. Phys.-Math. Sc.

Liding Researcher of the Department of Physics of Strength and Plasticity Inhomogeneous Alloys¹

E-mail: savva@imp.kiev.ua

¹Kurdyumov Institute of Metal Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine

Received 30 June 2015.

EFFECT OF STRUCTURE OF TITANIUM ALLOYS ON THE RELATIONSHIP CHARACTERISTICS OF THEIR DUCTILITY, TOUGHNESS AND MECHANICAL STABILITY

Formulated the idea of the two types of behavior of mechanical properties of structural titanium alloys in the relationship “plasticity — strength — mechanical stability”. It is shown that the same values of strength $\sigma_{0,2}$ and mechanical stability K_{ms} species belonging alloys is caused by their level of plasticity: the first type includes alloys increased, and the second — with a reduced level ψ_K . It is found that the species of the titanium alloys produced using powder metallurgy technology, the main influence the grain size and pore volume content, thus increasing the grain size and increase of porosity lead to a sharp decrease in the plastic properties of the alloy, which may cause changes in the behavior of their species mechanical characteristics. Specific accessory has a decisive influence on the degree of inclination of the alloy to its embrittlement under the influence of factors such as low temperature and stress concentrators (cracks, cuts, etc.).

Keywords: mechanical stability, generalized diagram, kind of behavior of mechanical characteristics, species

References

1. Meshkov Yu.Ya., Kotrechko S.A., Shiyan A.V. *Mekhanicheskaya stabilnost metallov i splavov* [The mechanical stability of metals and alloys]. Kiev, Naykova Dumka, 2014. 278 p.
2. Meshkov Yu.Ya., Shiyan A.V. Problema khrupkosti konstruktsiy [The problem of the fragility of structures]. *Mechanica machin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2015, no. 1(30), pp. 30–36.
3. Shiyan A.V., Meshkov Yu.Ya. Vzaimosvyaz svoystv prochnosti, plastichnosti i mekhanicheskoy stabilnosti konstruktsionnykh titanovykh splavov [Correlation properties of strength, ductility, and mechanical stability of the structural titanium alloys]. *Metallorazvedeniye i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallurgy and heat treatment of metals], 2014, no. 4, pp. 54–75.
4. Ivasishin O.M., Markowski P.E., Savvakina D.G., Kotrechko S.A., Meshkov Yu.Ya., Shiyan A.V. Optimizatsiya svoystv prochnosti, plastichnosti i mekhanicheskoy stabilnosti konstruktsionnykh titanovykh splavov [Optimization of properties of strength, ductility, and mechanical stability of the structural titanium alloys]. *Trudy Mezhdunarodnoy Konferentsii "Ti-2013 v SNG"* [Proc. of the International Conference "Ti-2013 in CIS"]. Donetsk, Ukraine, 2013, pp. 297–306.
5. Ivasishin O.M., et al. *Sposob opredeleniya optimalnogo sootnosheniya plastichnosti, prochnosti i mekhanicheskoy stabilnosti konstruktsionnykh metallicheskih splavov* [A method of determining the optimal ratio of ductility, strength and mechanical stability of the structural metal alloys]. Patent UK, no. 103814, 2013.
6. Shiyan A.V., Meshkov Yu.Ya. Otsenka mekhanicheskogo kachestva konstruktsionnykh titanovykh splavov po ih sposobnosti soprotivlyatsya ohrupchivaniyu pri odnoosnom rastyazhenii [Evaluation of mechanical properties of structural titanium alloys for their ability to resist embrittlement in uniaxial tension]. *Metallorazvedeniye i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallurgy and heat treatment of metals], 2015, no. 1, pp. 5–26.
7. Ivasishin O.M., Savvakina D.G., Matviychuk M.V., Bondarchuk V.I. Mikrostruktura i svoystva splava Ti-10V-2Fe-3Al, sintezirovannogo metodom poroshkovoy metallurgii [The microstructure and properties of the alloy Ti-10V-2Fe-3Al, synthesized by powder metallurgy]. *Tekhnologiya legkikh splavov* [The technology of light alloys], 2009, no. 2, pp. 70–76.
8. Ivasishin O.M., Savvakina D.G., Matviychuk M.V., Molyar O.G. Vliyaniye sposoba legirovaniya na mikrostrukturu i svoystva splava Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr, sintezirovannogo metodom smesey poroshkovykh komponentov [Influence of the alloying on the microstructure and properties of the alloy Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr, synthesized by the method of powder mixtures of component]. *Nauchnye vesti NTUU KPI* [Scientists conduct NTUU KPI], 2009, no. 4, pp. 79–84.
9. Ivasishin O.M., Savvakina D.G. The Impact of Diffusion on Synthesis of High-Strength Titanium Alloys from Elemental Powder Blends. *Key Engineering Materials*, 2010, vol. 436, pp. 113–121.
10. Ivasishin O.M., Markowski P.E., Kotrechko S.A., Meshkov Yu.Ya., Shiyan A.V. Svyaz harakteristik "hrupkoy" prochnosti i mekhanicheskoy stabilnosti s bazovymi mekhanicheskimi harakteristikami konstruktsionnykh titanovykh splavov [Communication characteristics of the "fragile" strength and mechanical stability with the basic mechanical properties of structural titanium alloys]. *Metallorazvedeniye i noveyshye tekhnologii* [Metal Physics and Advanced Technology], 2013, vol. 35, no. 4, pp. 479–496.