

УДК 669.71:544.3

DOI: 10.30838/P.CMM.2415.200418.48.6

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО γ -TiAl СПЛАВА

БЕЛОКОНЬ Ю. А.¹ к.т.н., доц.,
ЖЕРЕБЦОВ А. А.², ст. преп.,
ЧЕЙЛИТКО А. А.³, к.т.н., доц., докторант,
БЕЛОКОНЬ К. В.⁴, к.т.н., доц.

¹ кафедра обработки металлов давлением, Запорожская государственная инженерная академия, пр. Соборный, 226, 69006, Запорожье, Украина, тел. +38 (096) 1129554, e-mail: belokon.zp@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9327-5219

² кафедра естественных наук, Запорожская государственная инженерная академия, пр. Соборный, 226, 69006, Запорожье, Украина, тел. +38 (097) 9307833, e-mail: aazherbtsov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6076-2005

³ кафедра теплоэнергетики, Запорожская государственная инженерная академия, пр. Соборный, 226, 69006, Запорожье, Украина, тел. +38 (097) 0472333, e-mail: cheylitko@yandex.ua, ORCID ID: 0000-0002-5713-155X

⁴ кафедра прикладной экологии и охраны труда, Запорожская государственная инженерная академия, пр. Соборный, 226, 69006, Запорожье, Украина, тел. +38 (097) 7357141, e-mail: savela_karina@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-2000-4052

Аннотация. *Цель.* Установление закономерностей влияния состава на механические свойства (прочность и пластичность) интерметаллидного γ -TiAl сплава и нахождение его оптимального состава. *Методика.* Механические свойства определяли на стандартных разрывных образцах по ГОСТ 1497-84 на разрывной машине МУП-20 при нагрузке 5 т и скорости движения активного захвата 2,5 мм/мин. Параметры оптимизации: Y_1 – предел прочности (σ_b), МПа \rightarrow max; Y_2 – относительное удлинение (δ), % > 4 . В качестве независимых переменных были выбраны: содержание в сплаве ниобия (X_1), содержание в сплаве молибдена (X_2), содержание в смеси хрома (X_3). Для получения квадратичных коэффициентов уравнения регрессии использован ортогональный план второго порядка с ядром 2^3 . Для численного решения задачи оптимизации использовали пакет прикладных программ для инженерно-математических расчетов SciLab. *Результаты.* В результате оптимизации установлена точка, показывающая наилучшее сочетание прочности/пластичности при содержании химических элементов (8,27Nb; 3,18Mo; 2Cr), что позволяет получить сплав с $\sigma_b = 1200$ МПа и $\delta = 4\%$. . . Рекомендуемый оптимальный состав интерметаллидного γ -TiAl сплава, мас. %: алюминий – 30 %, ниобий – 8 %, молибден – 5 %, хром – 1,7 %, титан – остальное. *Научная новизна.* Установлены закономерности влияния легирующих элементов на механические свойства интерметаллидных γ -TiAl сплавов. *Практическая значимость.* Проведенные расчеты позволяют рекомендовать для практического применения следующий состав интерметаллидного γ -TiAl сплава: Ti-44Al-4Nb-2Mo-1Cr.

Ключевые слова: интерметаллиды; Ti-Al сплавы; оптимизация; прочность/пластичность

ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ ІНТЕРМЕТАЛІДНОГО γ -TiAl СПЛАВУ

БЕЛОКОНЬ Ю. О.¹ к.т.н., доц.,
ЖЕРЕБЦОВ О. А.², ст. викл.,
ЧЕЙЛИТКО А. О.³, к.т.н., доц., докторант,
БЕЛОКОНЬ К. В.⁴, к.т.н., доц.

¹ кафедра обробки металів тиском, Запорізька державна інженерна академія, пр. Соборний, 226, 69006, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (096) 1129554, e-mail: belokon.zp@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9327-5219

² кафедра природничих наук, Запорізька державна інженерна академія, пр. Соборний, 226, 69006, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (097) 9307833, e-mail: aazherbtsov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6076-2005

³ кафедра теплоенергетики, Запорізька державна інженерна академія, пр. Соборний, 226, 69006, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (097) 0472333, e-mail: cheylitko@yandex.ua, ORCID ID: 0000-0002-5713-155X

⁴ кафедра прикладної екології та охорони праці, Запорізька державна інженерна академія, пр. Соборний, 226, 69006, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (097) 7357141, e-mail: savela_karina@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-2000-4052

Анотація. *Мета.* Встановлення закономірностей впливу складу на механічні властивості (міцність і пластичність) інтерметалідного γ -TiAl сплаву і знаходження його оптимального складу. *Методика.* Механічні властивості визначали на стандартних розривних зразках за ГОСТ 1497-84 на розривній машині МУП-20 при навантаженні 5 т і швидкості руху активного захоплення 2,5 мм/хв. Параметри оптимізації: Y_1 - границя міцності (σ_b), МПа \rightarrow max; Y_2 - відносне подовження (δ), % > 4 . У якості незалежних змінних були обрані: вміст у сплаві ніобію (X_1), вміст у сплаві молибдену (X_2), вміст у суміші хрому (X_3). Для отримання квадратичних коефіцієнтів рівняння регресії використаний ортогональний план другого порядку з ядром 2^3 . Для чисельного рішення задачі оптимізації використовували пакет прикладних програм для інженерно-математичних розрахунків SciLab. *Результати.* В результаті оптимізації встановлена точка, що показує найкраще поєднання міцності/пластичності при вмісті хімічних елементів (8,27Nb; 3,18Mo; 2Cr), що дозволяє отримати сплав з $\sigma_b =$

1200 МПа и $\delta = 4\%$. Рекомендованный оптимальный состав интерметаллического γ -TiAl сплаву, мас. %: алюминий - 30%, ниобий - 8%, молибден - 5%, хром - 1,7%, титан - и др. **Научная новизна.** Встановлено закономірності впливу легуючих елементів на механічні властивості інтерметалічних γ -TiAl сплавів. **Практична значимість.** Проведені розрахунки дозволяють рекомендувати для практичного застосування наступний склад інтерметалічного γ -TiAl сплаву: Ti-44Al-4Nb-2Mo-1Cr.

Ключові слова: інтерметаліди; Ti-Al сплави; оптимізація; міцність / пластичність

OPTIMIZATION OF INTERMETALLIC γ -TiAl ALLOY

BELOKON Y. A.¹ Ph. D., Assos.prof.,
ZHEREBTSOV A. A.², Senior Lecturer,
CHEYLITKO A. A.³, Ph. D., Assos.prof., Dr. student
BELOKON K. V.⁴, Ph. D., Assos.prof.,

Annotation. Purpose. Determination of compound influence on the mechanical properties (strength and plasticity) of intermetallic γ -TiAl alloy, and determination of its optimum composition. **Methodology.** The mechanical properties were determined on standard discontinuous specimens in accordance with GOST 1497-84 on a tearing machine MUP-20. Optimization parameters: Y1 - ultimate strength (σ_B), MPa \rightarrow max; Y2 - relative elongation (δ), % > 4 . As independent variables, the content of niobium (X1), the content of molybdenum (X2), the content of the chromium mixture (X3) were chosen in the alloy. **Findings.** It is established the best combination of strength/ductility with the content of chemical elements (8.27Nb, 3.18Mo, 2Cr), which makes it possible to obtain an alloy with $\sigma_s = 1200$ MPa and $\delta = 4\%$. Recommended optimum composition of intermetallic γ -TiAl alloy, wt. %: aluminum - 30%, niobium - 8%, molybdenum - 5%, chromium - 1,7%, titanium - the rest. **Originality.** The regularities of the influence of alloying elements on the mechanical properties of intermetallic γ -TiAl alloys. **Practical value.** The calculations made allow us to recommend the following composition of intermetallic γ -TiAl alloy for practical use: Ti-44Al-4Nb-2Mo-1Cr.

Keywords: intermetallic compounds; Ti-Al alloys; optimization; strength / ductility

Введение

Основное внимание разработчиков интерметаллических γ -TiAl сплавов в последние два десятилетия было сконцентрировано на достижении оптимального сочетания механических свойств с помощью варьирования микроструктуры от полностью пластинчатой к дулексной с различным размером зерен и толщиной пластин [1]. В зависимости от содержания алюминия сплавы на основе γ -TiAl принято разделять на две группы: однофазные – γ -сплавы (50-52% Al) и двухфазные $\gamma+\alpha_2$ сплавы (44-49% Al). В зависимости от технологии получения заготовок, режимов горячей деформации и термической обработки двухфазных сплавов выделяют три основных типа структуры интерметаллида на основе алюминидов титана: ламельные (пластинчатую), рекристаллизованную (глобулярную) и бимодальную (дулексную). В зарубежной литературе встречается классификация на четыре типа структуры: near-gamma, duplex, nearly-lamellar, fullylamellar. На сегодняшний день не существует универсального γ -TiAl сплава, характеристики которого в полной мере удовлетворяли бы требованиям разработчиков авиационной та ракетно-космической техники по всему спектру эксплуатационных свойств. Оптимизация химического состава и микроструктуры этих материалов привела к генерации их трех поколений (состав в атомных процентах) [2-7].

I поколение - Ti-48Al-1V-0.3C.

II поколение - Ti- (45-48) Al- (1-3)X - (2-5)Y - (<1)Z.

где: X = Cr, Mn, V; Y = Nb, Ta, W, Mo; Z = Si, B, C.
III поколение - Ti- (45-47) Al- (5-10) Nb - (<1) B, C.

Промышленные γ -TiAl сплавы второго поколения содержат, по крайней мере, один X-элемент и один Y-элемент, которые повышают сопротивление окислению и ползучести. Подобно жаропрочным никелевым суперсплавам, они могут содержать до восьми легирующих элементов. Эти сплавы обладают хорошей обрабатываемостью, удовлетворительными прочностными свойствами, удлинением при растяжении 1-3% при комнатной температуре, вязкостью разрушения от 10 до 25 МПа/м [3]. Однако по характеристикам ползучести их применение ограничено 700°C, особенно при длительной эксплуатации. При температурах выше 700°C может сказываться также недостаточное сопротивление окислению.

Сплавы третьего поколения разрабатывают с целью повышения их рабочих температур. Работы ведутся в двух направлениях: а) на основе сплавов с высоким содержанием ниобия; б) разработка дисперсионно-упрочненных сплавов [2, 4]. Сплавы на основе TiAl с содержанием ниобия от 5 до 10 % и малыми добавками В и С обозначают TNB [2]. Эти сплавы обладают более высокой прочностью и сопротивлением окислению по сравнению со сплавами второго поколения. По мнению автора [5], сплавы на основе TiAl могут обладать приемлемым сопротивлением ползучести до температуры 750 °C при дулексной (ламельно-зернистой) структуре, и до 950 °C при ламельной.

Последней по времени тенденцией развития технологии жаропрочных γ -интерметаллидов на основе TiAl связано с их специальным микроструктурированием, т.е. уменьшением как среднего размера первичного поликристаллического зерна, так и толщины ламелей γ - и α_2 -фаз после посткристаллизационных твердофазных трансформаций, происходящих в соответствии с диаграммой состояния сплава конкретного химического состава [1, 3, 4]. Инновационные γ -TiAl сплавы (TNM-подобные сплавы), содержат 42-46 ат.% алюминия, и в качестве лигатур в сумме до 10 ат.% переходные металлы. Помимо обязательного Nb, могут использоваться такие β -стабилизаторы, как Mo, Ta, Zr, Cr, W, V.

В тоже время, на сегодняшний день не существует строгих аналитических зависимостей, связывающих параметры структуры TiAl-интерметаллидов и их состав с механико-прочностными характеристиками материала. Развитие материаловедения в этой области находится на уровне эмпирических исследований, учёта качественных закономерностей, поэтому при планировании работы можно руководствоваться только независимыми структурными, композиционными и прочностными исследованиями образцов с целью получения эмпирических данных. Наиболее перспективная микроструктура литого сплава характеризуется наличием ультра-мелких равноосных зёрен-колоний, полностью заполненных расслоившимися ламелями TiAl- и Ti_3Al -фаз. Такая микроструктура, характерная для сплавов, созданных на основе Ti-Al-Nb.

Цель работы

Целью работы является установление закономерностей влияния состава на механические свойства (прочность и пластичность) интерметаллидного γ -TiAl сплава и нахождение его оптимального состава.

Методика исследования

Механические свойства определяли на стандартных разрывных образцах по ГОСТ 1497-84 на разрывной машине МУП-20 при нагрузке 5 т и скорости движения активного захвата 2,5 мм/мин. Во время испытания образца записывали диаграмму растяжения, фиксирующую зависимость между действующей на образец силой P и вызванной ею деформацией Δl .

Параметры оптимизации:

Y_1 – предел прочности (σ_b), МПа $\rightarrow \max$;

Y_2 – относительное удлинение (δ), %. > 4 .

В качестве независимых переменных были выбраны: содержание в сплаве ниобия (X_1), содержание в сплаве молибдена (X_2), содержание в смеси хрома (X_3). В качестве исходных компонентов использовали чистые порошки титана, алюминия, ниобия, молибдена и хрома. Дисперсность порошков

составляла 50-100 мкм. Схема приготовления шихты включала дозировку, смешивание, заполнение формы, прессование и термическую обработку.

Для получения квадратичных коэффициентов уравнения регрессии использован ортогональный план второго порядка с ядром 2^3 [6, 7]. Расчетные уровни интервалов варьирования, характер их изменений и схемы кодирования представлены в таблице 1. Ниобий, применённый в больших концентрациях, увеличивает количество α_2 -фазы в сплавах, измельчает микроструктуру, повышает сопротивление окислению. Хром уменьшают энергию дефектов упаковки, что приводит к увеличению пластичности при комнатной температуре в результате повышения склонности сплавов к двойникованию. Молибден, имеющий высокую β -стабилизирующую активность, измельчает зерно.

Таблица 1.

Исследуемые факторы / Factors studied

| Характеристика | Факторы | | |
|-----------------------|---------------|---------------|---------------|
| | Nb, % мас. | Mo, % мас. | Cr, % мас. |
| Код | X_1 | X_2 | X_3 |
| Основной уровень | 8 | 3 | 2 |
| Интервал варьирования | 4 | 2 | 1 |
| Нижний уровень | 4 | 1 | 1 |
| Верхний уровень | 12 | 5 | 3 |

Результаты исследования

В результате регрессивного анализа, согласно методике, рассмотренной в работе [8], были получены уравнения, показывающие зависимость механических свойств γ -TiAl сплава от содержания легирующих элементов:

$$Y_1 = 1198,22 + 20 X_1 + 12 X_2 + 7 X_3 - 147,78 X_1^2 - 37,78 X_2^2 - 12,78 X_3^2 - 5 X_1 X_2 - 2,5 X_1 X_3 - 2,5 X_2 X_3; \quad (1)$$

$$Y_2 = 3,89 + 1,02 X_1 + 0,54 X_2 - 0,08 X_3 - 0,97 X_1^2 - 0,37 X_2^2 + 0,33 X_3^2 - 0,16 X_1 X_2 + 0,04 X_1 X_3 - 0,01 X_2 X_3 \quad (2)$$

Проверка значимости коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента и оценка адекватности модели по критерию Фишера представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Проверка результатов регрессивного анализа на значимость и адекватность / Checking the results of regression analysis for relevance and relevance

| Параметр | Функции отклика | |
|------------|-----------------|-------------|
| | Y_1 | Y_2 |
| Δb | 10,14 | 0,10 |
| t-критерий | 2,78 | 2,78 |
| F-критерий | 6,09 > 3,69 | 6,09 > 6,02 |

Коэффициенты, абсолютная величина которых равна доверительному интервалу Δb или больше его,

следует признать статистически значимыми. Статистически незначимые коэффициенты (в данном случае b_{12} , b_{13} , b_{23}) из моделей можно исключить.

Проверка адекватности моделей показывает, что их можно использовать для прогнозирования значений функций отклика при любых значениях факторов, находящихся между верхним и нижним уровнями. Для этого целесообразно перейти к натуральным переменным, используя формулу перевода, представленную в следующем виде [7]:

$$X_{ij}^k = \frac{X_{ij}^n - X_{ij}^o}{\Delta_i}, \quad (3)$$

где X_{ij}^k — кодированное значение изучаемого i -го фактора в j -ом уравнении; X_{ij}^n — натуральное значение изучаемого i -го фактора в j -ом уравнении; X_{ij}^o — значение изучаемого i -го фактора в j -ом уравнении на основном уровне; Δ_i — значение интервала варьирования изучаемого i -го фактора.

Путем замены в уравнения (1)-(2) переменных X_i на правую часть уравнения (3) и последующим приведением подобных получаем натуральные уравнения, описывающие влияния содержания легирующих элементов на механические свойства γ -TiAl сплавов:

$$\sigma_B = 413 + 152,78Nb + 62,67Mo + 51,11Cr - 9,23Nb^2 - 9,44Mo^2 - 12,78Cr^2; \quad (4)$$

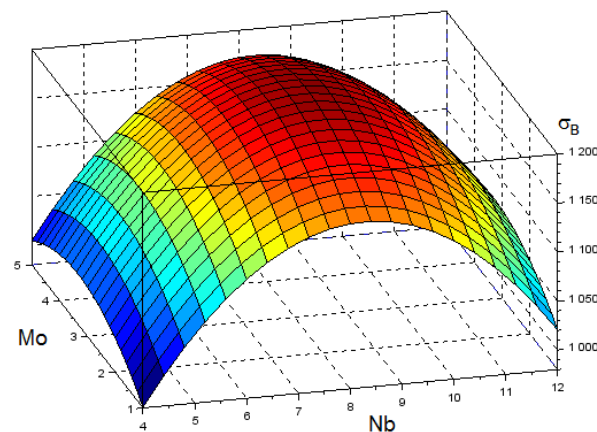
$$\delta = -2,8 + 1,28Nb + 0,98Mo - 1,33Cr - 0,06Nb^2 - 0,1Mo^2 + 0,33Cr^2 - 0,02NbMo. \quad (5)$$

Как видно из уравнения (4) зависимость предела прочности от легирующих элементов носит эллиптический характер, без их взаимного влияния. С учетом вышесказанного, методом градиентного спуска в прикладной программе для решения инженерно-математических задач SciLab [8] была получена точка оптимума $\max(\sigma_B)$:

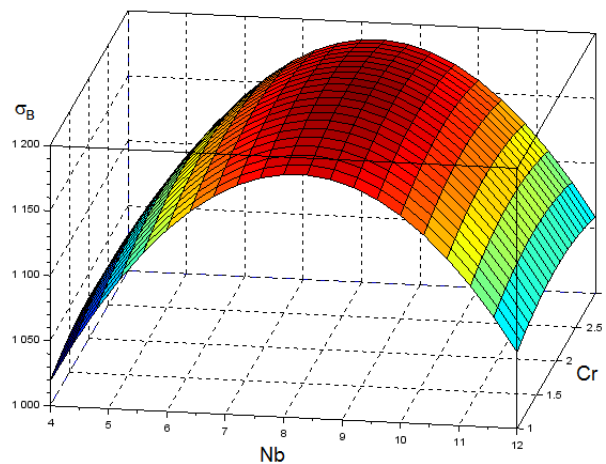
$$\sigma_B(8,27;3,18;2)=1199,86 \text{ МПа}.$$

Ниже представлены графики зависимости предела прочности от концентрации легирующих элементов (рис. 1). Для каждого из графиков значение третьего фактора брали на оптимальном уровне.

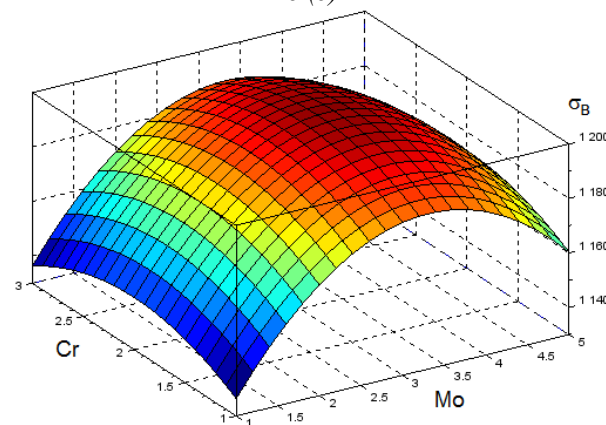
Из анализа полученных уравнений видно, что наиболее сильно механические свойства γ -TiAl сплавов зависит от содержания в сплаве ниобия и молибдена. Заметно влияет соотношение между количеством ниобия и молибдена. Представление результатов эксперимента полиномом второй степени оказалось оправданным — значительная часть нелинейных членов здесь значимо отличается от нуля. Поскольку нелинейные коэффициенты регрессии имеют одинаковые знаки, поверхность отклика — эллипсоид, а ее центр — экстремум, причем максимум, так как коэффициенты регрессии отрицательны. Как и предполагалось при постановке задачи, оптимальное содержание легирующих элементов анализируемого состава лежит в области эксперимента, причем, вблизи ее центра.



а (а)



б (б)



в (с)

Рис. 1. График функции (4) при значении $Cr=2$ (а),

$Mo=3,18$ (б), $Nb=8,27$ (в)

Function (4) graph with value of $Cr=2$ (а), $Mo=3,18$ (б), $Nb=8,27$ (с)

Уравнение (5) является эллиптическим параболоидом. Экстремум по третьему фактору с учетом области допустимых значений находится в максимально допустимой концентрации ($Cr=3$). Проведя численную оптимизацию по двум оставшимся факторам, получим следующую точку оптимума $\max(\delta)$:

$$\delta(9,89;4,26;3)=4,63 \text{ \%}.$$

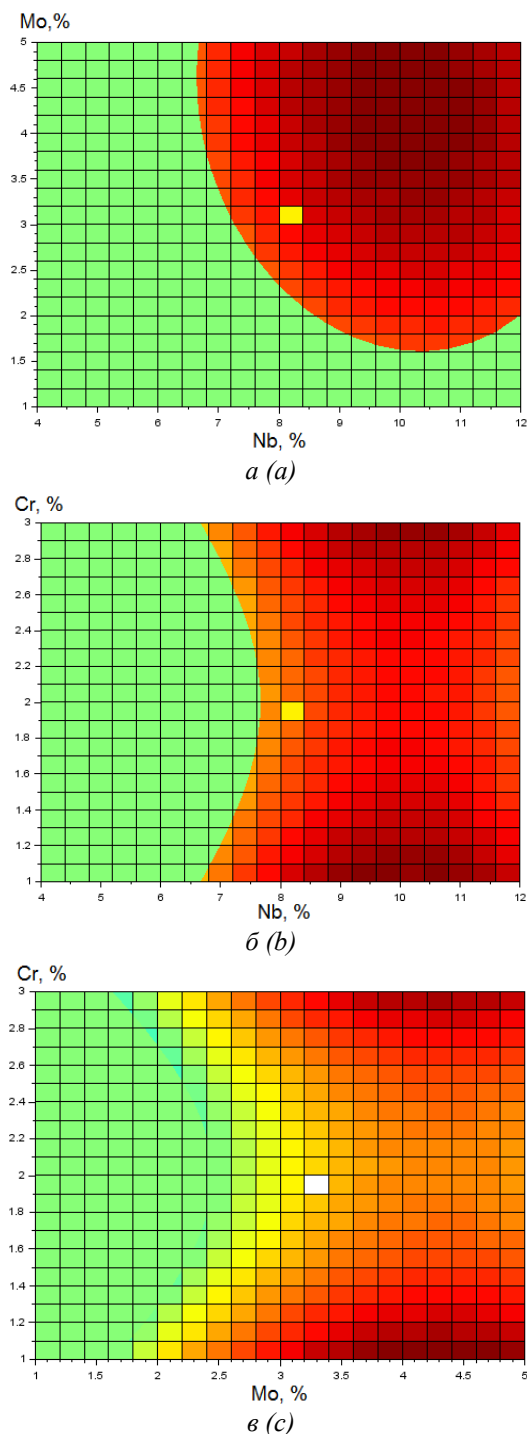


Рис. 2. Фазовая плоскость функции (5) при значениях $Cr=3(a)$, $Mo=4,26(b)$, $Nb=9,89(в)$
 Function (4) phase plate with value of $Cr=3(a)$, $Mo=4,26(b)$, $Nb=9,89(c)$

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Амосов А. П. Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов / А. П. Амосов, И. П. Боровинская, А. Г. Мержанов; под ред. В. Н. Анциферова. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 567 с.
- Belokon Y. The investigation of nanostructure formation in intermetallic γ -TiAl alloys / Y. Belokon, A. Zherebtsov, K. Belokon // Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF), 2017 IEEE International. – 2017. - P. 311-314. DOI: [10.1109/YSF.2017.8126640](https://doi.org/10.1109/YSF.2017.8126640)
- Белоконь Ю.А. Исследование условий взаимодействия интерметаллидных систем при нестационарных температурных процессах / Ю.А. Белоконь, А.А. Жеребцов, К.В. Белоконь, А.А. Чейлитко //

На рисунке 2 приведены допустимые значения уравнения (5) с учетом параметра оптимизации ($>4\%$). Как видно из рисунка 2, оптимальное значение предела прочности лежит в рациональной области функции пластичности.

Таким образом, рекомендуемый оптимальный состав интерметаллидного γ -TiAl сплава, мас. %: алюминий – 30 %, ниобий – 8,3 %, молибден – 3,18 %, хром – 2 %, титан — остальное. (Формула Ti-44Al-4Nb-2Mo-1Cr).

Научная новизна и практическая ценность

Установлены закономерности влияния легирующих элементов на механические свойства интерметаллидных γ -TiAl сплавов. Доказано, что наилучшее сочетание показателей прочность/пластичность достигается при следующем содержании химических элементов $\sigma_b(8,27Nb;3,18Mo;2Cr)=1199,86$ МПа.

Проведенные расчеты позволяют рекомендовать для практического применения следующий состав интерметаллидного γ -TiAl сплава: Ti-44Al-4Nb-2Mo-1Cr.

Выводы.

1. В результате проведения математического планирования получены уравнения, описывающие влияния содержания легирующих элементов на механические свойства γ -TiAl сплавов:

$$\sigma_b = 413 + 152,78Nb + 62,67Mo + 51,11Cr - 9,23Nb^2 - 9,44Mo^2 - 12,78Cr^2;$$

$$\delta = -2,8 + 1,28Nb + 0,98Mo - 1,33Cr - 0,06Nb^2 - 0,1Mo^2 + 0,33Cr^2 - 0,02NbMo.$$

2. В результате оптимизации установлена точка, показывающая наилучшее сочетание прочности/пластичности при содержании химических элементов (8,27Nb;3,18Mo;2Cr), что позволяет получить сплав с $\sigma_b=1200$ МПа и $\delta=4\%$.

3. Рекомендуемый оптимальный состав катализатора, мас. %: алюминий – 30 %, ниобий – 8 %, молибден – 5 %, хром – 1,7 %, титан — остальное. (Формула Ti-44Al-4Nb-2Mo-1Cr).

Исследования проводились при поддержке МОНУ в рамках госбюджетной научно-технической работы молодых ученых № 0116U007400.

- Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Стародубовские чтения. – Вып. 95. – 2017. – С. 35-39.
4. Середя Б.П. Обробка металів тиском при нестационарних температурних умовах: монографія / Б.П. Середя, І.В. Кругляк, О.А. Жеребцов, Ю.О. Белокоп'я. – Запоріжжя: ЗДІА, 2009. – 252 с.
 5. Sereda B. The influence of deformation process at titan aluminides retrieving by SHS-compaction technologies / B. Sereda, I. Kruglyak, A. Zherebtsov, Y. Belokon' // Metallurgical and Mining Industry. - vol. 3. – 2011.- P. 59-62.
 6. Sereda B. The Modelling of Products Pressing in SHS-Systems / B. Sereda, I. Kruglyak, A. Zherebtsov, Y. Belokon' // Material Science & Technology. – Pittsburg, USA. – 2009. – 827-831.
 7. Sereda B. The Processes Research of Structurization of Titan Aluminides Received by SHS / B. Sereda, I. Kruglyak, S. Sheyko, A. Zherebtsov, Y. Belokon' // Material Science & Technology. – Pittsburg, USA. – 2008. – P. 2069-2073.
 8. Scilab. The official site of software for numerical computation: <http://www.scilab.org>.

REFERENCES

1. Amosov A.P., Borovinskaya I.P. and Merzhanov A.G. *Poroshkovaya tekhnologiya samorasprostranyayushchegosya vysokotemperaturnogo sinteza materialov* [Powder technology of self-propagating high-temperature synthesis of materials]. Moscow: Mashinostroenie-1, 2007, 567 p. (in Russian).
2. Belokon Y., Zherebtsov A. and Belokon K. "The investigation of nanostructure formation in intermetallic γ -TiAl alloys", Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF), , 2017 IEEE International, pp. 311-314, 2017. DOI: [10.1109/YSF.2017.8126640](https://doi.org/10.1109/YSF.2017.8126640)
3. Belokon Y., Zherebtsov A., Belokon K and Cheylitko A. "The investigation of interaction conditions in intermetallide systems under non-stationary temperature processes", Construction, materials science, mechanical engineering, vol. 95, pp. 35-39, 2017.
4. Sereda B.P., Kruglyak I.V., Zherebtsov O.A. and Belokon Y.O. *Obrobka metaliv tyskom pry nestatsionarnykh temperaturnykh umovakh* [Metal forming at unsteady temperature conditions]. Zaporozhye: ZSEA, 2009, 252 p. (in Ukrainian).
5. Sereda B., Kruglyak I., Zherebtsov A and Belokon Y. "The influence of deformation process at titan aluminides retrieving by SHS-compaction technologies", Metallurgical and Mining Industry, vol. 3, pp. 59-62, 2011.
6. Sereda B., Kruglyak I., Zherebtsov A. and Belokon' Y. *The Modelling of Products Pressing in SHS-Systems*. Material Science & Technology, 2009, vol. 1, pp. 827-831.
7. Sereda B., Kruglyak I., Sheyko S., Zherebtsov A. and Belokon' Y. *The Processes Research of Structurization of Titan Aluminides Received by SHS*. Material Science & Technology, 2008, vol. 1, pp. 2069-2073.
8. Scilab. The official site of software for numerical computation: <http://www.scilab.org>.

Стаття рекомендована до публікації д-ром. техн. наук, проф. В. І. Большаковим (Україна), д-ром. техн. наук, проф. Д. В. Лаухінім (Україна)