

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН  
КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ К. И. САТПАЕВА

ИНСТИТУТ МЕТАЛЛУРГИИ И ОБОГАЩЕНИЯ

## МАТЕРИАЛЫ

Международной научно-практической конференции  
ЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЦВЕТНЫХ,  
РЕДКИХ И БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ



Алматы 2018 Almaty

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН  
КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ К. И. САТПАЕВА  
ИНСТИТУТ МЕТАЛЛУРГИИ И ОБОГАЩЕНИЯ**

**Металлургия ғылымы мен өнеркәсібінің мәселелеріне және белгілі  
ғалым металлург, ҚР ҰҒА корреспондент мүшесі,  
Қазақстан Республикасы Мемлекеттік сыйлығының иегері  
Болат Балтақайұлы Бейсембаевті еске алуға арналған  
«Түсті, сирек және асыл металдарды өндірудің тиімді технологиялары»  
атты Халықаралық ғылыми-практикалық конференцияның**

**МАТЕРИАЛДАРЫ**

**МАТЕРИАЛЫ**

**Международной научно-практической конференции  
«Эффективные технологии производства цветных, редких и  
благородных металлов», посвященной проблемам металлургической  
науки и промышленности и памяти известного ученого-металлурга,  
члена-корреспондента Академии наук РК,  
лауреата Государственной премии Республики Казахстан  
Булата Балтакаевича Бейсембаева**

**PROCEEDINGS**

**of International scientific and practical conference  
“The Effective Technologies of Non-Ferrous,  
Rare and Precious Metals Manufacturing” devoted to the metallurgy  
science and industry concerns and in memory of well-known scientist  
of metallurgy, Associate Member of the National Academy  
of Sciences of Kazakhstan, the honoree of the State Prize of the  
Republic of Kazakhstan Bulat Baltakayevich Beisembayev**

**Алматы 2018**

**УДК 669**  
**ББК 34.3**  
**Э94**

**Ответственный редактор:** д.т.н., проф. Кенжалиев Б.К.

**Жауапты редактор:** т.ғ.д., проф. Кенжалиев Б.К.

**Редакционный совет:** д.т.н., проф. Кенжалиев Б.К., д.т.н., проф. Загородняя А.Н., д.т.н. Квятковский С.А., к.т.н. Кульдеев Е.И., к.х.н. Темирова С.С., PhD Касымова Г.К.

**Редакциялық алқа:** т.ғ.д., проф. Кенжалиев Б.К., т.ғ.д., проф. Загородняя А.Н., т.ғ.д. Квятковский С.А., т.ғ.к. Көлдеев Е.И., х.ғ.к. Темирова С.С., PhD Касымова Г.К.

**«Эффективные технологии производства цветных, редких и благородных металлов»:** Материалы Межд. научно-практ. конф. / Сост.: к.х.н. Темирова С.С., к.т.н. Кульдеев Е.И., Садыкова Т.С. – Алматы, 2018. – 440 с.

**«Түсті, сирек және асыл металдарды өндірудің тиімді технологиялары»:** Халықар. ғыл. практ. конф. материалдары / Құраст.: х.ғ.к. Темирова С.С., т.ғ.к. Көлдеев Е.И., Садыкова Т.С. – Алматы, 2018. – 440 б.

**ISBN 978-601-323-132-7**

В Материалах конференции «Эффективные технологии производства цветных, редких и благородных металлов» представлены результаты фундаментальных и прикладных исследований в области металлургии цветных, редких и благородных металлов, обогащения минерального и техногенного сырья, получения высокочистых металлов и перспективных материалов, а также разработки новых и усовершенствования существующих технологических схем, процессов и аппаратов.

Материалы конференции предназначены для ученых и специалистов, работающих в области переработки минерального сырья и материаловедения.

«Түсті, сирек және асыл металдарды өндірудің тиімді технологиялары» атты конференцияның материалдарында түсті, сирек және асыл металдар металлургиясы, минералдық және техногенді шикізаттарды байыту, тазалығы жоғары металдар мен келешегі зор материалдарды алу, сонымен қатар жаңа технологиялық схемаларды, үрдістерді және аппараттарды жасап шығару және олардың бұрыннан келе жатқан түрлерін жетілдіру салаларындағы іргелі және қолданбалы зерттеулердің нәтижелері келтірілген.

Конференция материалдары материалтану және минералды шикізаттарды өңдеу саласында жұмыс жасайтын ғалымдар мен мамандарға арналған.

**УДК 669**  
**ББК 34.3**

**ISBN 978-601-323-132-7**

© АО «ИМиО», 2018

# МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАММА СПЛАВОВ СИСТЕМ Ti-Al-Nb-Mo, Ti-Al-Nb-Mo-Cr

<https://doi.org/10.31643/2018-7.40>

\*Алимжанова А.М.<sup>1,2</sup>, Терликбаева А.Ж.<sup>1</sup>, Шаяхметова Р.А.<sup>1</sup>,  
ORCID: 0000-0001-6098-7626 0000-0002-2537-897X 0000-0003-2265-2125  
Смагулов Д.У.<sup>1</sup>, Белов Н.А.<sup>3</sup>  
0000-0002-0599-8741

<sup>1</sup>РГП «Национальный центр по комплексной переработке минерального сырья РК»,  
г. Алматы, Казахстан, \*aliyuchsa@mail.ru;

<sup>2</sup>НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет  
имени К.И. Сатпаева», г. Алматы, Казахстан;

<sup>3</sup>НИТУ «Московский институт стали и сплавов», г. Москва, Россия

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследований механических свойств гамма сплавов систем Ti-Al-Nb-Mo, Ti-Al-Nb-Mo-Cr. Показано снижение на 6% предела текучести сплава системы TNM-Cr по сравнению с сплавом TNM после горячего изотермического прессования при 1250°С и стабилизирующего отжига при 800°С.

Одним из перспективных является  $\gamma$ -сплав TNM системы Ti-Al-Nb-Mo [1, 2]. Ряд сплавов на основе этого интерметаллида обладает не только высокими литейными свойствами, но и повышенным комплексом механических свойств [1-4]. Однако, их жаростойкость при температурах более 650°С, стойкость к тепловым ударам (термостойкость) являются неудовлетворительными [5]. В отличие от обычных титановых сплавов фазовый состав и структура  $\gamma$ -сплавов на основе алюминидов титана TiAl более сложные и в значительной степени зависят от концентрации легирующих компонентов [6, 7].

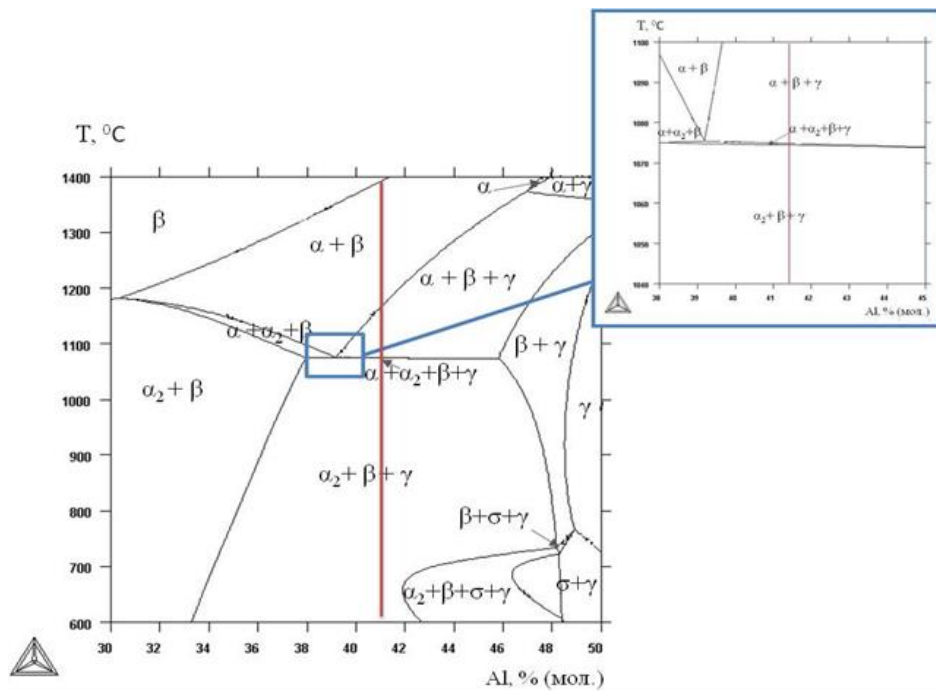
Для увеличения жаростойкости сплавов на основе  $\gamma$ -TiAl их легируют различными элементами, в том числе, элементами, имеющими большую валентность, чем валентность титана, в частности Nb [5], которые модифицируют их поверхностные слои; проводят комплексную защиту [8, 9].

В ранее опубликованных работах [10, 11] нами расчетными и экспериментальными методами дана оценка фазового состава и структуры  $\gamma$ -сплава системы Ti-Al-Nb-Mo.

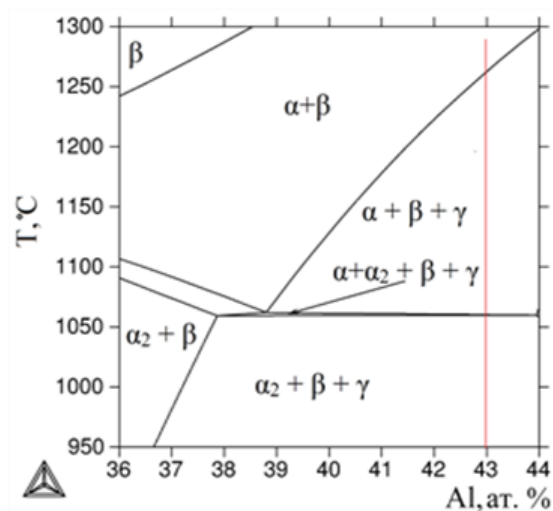
Характерные политермическиерезрезы построенные на основании расчетов с использованием компьютерной программы Thermo-Calc систем Ti-Al-Nb-Mo и Ti-Al-Nb-Mo-Cr (TNM+Cr) приведены на рисунке 1.

Представленные разрезы при варьируемой концентрации алюминия и постоянной концентрации остальных элементов, соответствующих фактическому составу сплавов позволяют проследить последовательность фазовых превращений в сплавах в процессе кристаллизации и при последующем охлаждении. Оба рассматриваемых сплава в равновесных условиях заканчивают кристаллизацию в  $\beta$ -области, после чего следует ряд твердофазных превращений.

Качественно фазовые превращения в обоих сплавах одинаковы. В частности, после кристаллизации  $\beta$ -фазы следует полиморфное превращение  $\beta \rightarrow \alpha$ , приводящее к появлению  $\alpha$ -фазы. Далее, при пересечении температуры  $T_\gamma$  (таблица 1) происходит выделение вторичных кристаллов  $\gamma$ -фазы. Далее следует эвтектоидное превращение, которое для обоих сплавов является четырехфазным  $\alpha \rightarrow \alpha_2 + \beta + \gamma$ . Эта реакция не является неинвариантной, но ее температурный интервал не превышает 2°С (рисунок 1). Температуры перечисленных фазовых превращений и температурные интервалы одно-, двух- и трех-фазовых областей приведены в таблице 1.



а)



б)

- а) Ti– Al– Nb–Mo, содержание, %:Nb 4,52 и Mo 1,07;  
 б) Ti– Al– Nb–Mo–Cr, содержание, % :Nb 4,31, Mo 1,02 , Cr 0,9

Рисунок 1 – Политермические разрезы

Таблица 1– Температуры начала фазовых превращений и температурные интервалы фазовых областей TNM и TNM+ Cr сплавов в твердом состоянии (расчет)

Сплав	Температурный интервал, °C			Температура, °C		
	$\beta$	$\beta+\alpha$	$\beta+\alpha+\gamma$	$T_\alpha$	$T_\gamma$	$T_\epsilon$
TNM	100	185	174	1433	1248	1074
TNM+ Cr	91	146	202	1408	1262	1060

Из рассчитанных значений следует, что рассматриваемые сплавы слабо различаются по температурам появления фаз  $\alpha$  ( $T_\alpha$ ),  $\gamma$  ( $T_\gamma$ ) и имеют близкие температуры эвтектоидного превращения ( $T_e$ ) (от 1060 до 1074°C).

Следует отметить, что гамма- сплавы, как правило, подвергают горячему изостатическому прессованию (ГИП), которое проводят при температуре эвтектоидного превращения для устранения литейной пористости и повышения механических свойств.

Результаты микрорентгеноспектрального анализа по сплавам TNM и TNM+Cr после ГИП обработки в течение 3 часов и стабилизирующего отжига при 800 °С в течение 3 часов приведены в таблице 2.

Таблица 2- Распределение элементов в структуре сплавов TNM и TNM+Cr после ГИП обработки и стабилизирующего отжига

Сплав	Температура ГИП обработки, °С	Концентрация, масс. %					Идентификация
		Al	Ti	Nb	Mo	Cr	
TNM	1250	27,96	60,23	10,19	1,62	–	$\alpha$ ( $\gamma/\alpha_2$ )
		23,30	58,47	11,60	6,63	–	$\beta$
		32,09	56,48	10,16	1,27	–	$\gamma$
	1100	27,13	61,47	9,25	2,15	–	$\alpha$ ( $\gamma/\alpha_2$ )
		21,23	60,21	12,02	6,54	–	$\beta$
		30,00	58,28	10,28	1,44	–	$\gamma$
TNM+ Cr	1250	27,08	60,41	9,88	1,67	0,96	$\alpha$ ( $\gamma/\alpha_2$ )
		23,30	59,73	9,94	4,57	2,46	$\beta$
		30,47	58,65	9,25	0,98	0,65	$\gamma$
	1100	27,51	60,15	9,25	2,12	0,97	$\alpha$ ( $\gamma/\alpha_2$ )
		24,08	58,65	11,26	4,39	1,62	$\beta$
		29,87	58,62	9,64	1,03	0,84	$\gamma$

Полученные данные в целом соответствуют результатам расчета.

Чтобы оценить совместное действие хрома, ниобия и молибдена на механические свойства сплавов после обработки ГИП и стабилизирующего отжига при 800 °С, были проведены одноосные испытания на растяжение и деформацию при сжатии испытательных стержней при комнатной температуре.

Одноосные испытания на растяжение показали, что, как и ожидалось, крупнозернистая структура сплава TNM после ГИП обработки стабилизирующего отжига приводит к хрупкому разрушению с удлинением 0,5%, пределом текучести 680 МПа и пределом прочности при растяжении 750 МПа. Для сплава TNM + Cr удлинение составляет 0,8%, предел текучести 675 МПа, а предел прочности на разрыв 715 МПа.

Полученные типичные кривые показаны на рисунке 2.

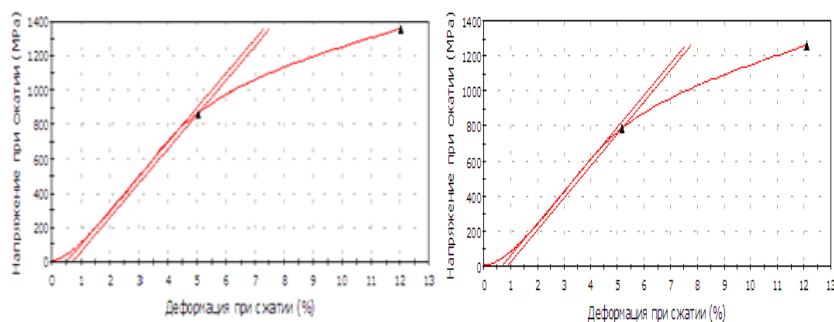


Рисунок 2 - Кривые одноосного сжатия: а) Ti– Al– Nb–Mo; б) Ti– Al– Nb–Mo–Cr

Основные механические свойства сплавов, полученные в результате анализа кривых деформации, приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Механические свойства сплавов TNM и TNM + Cr, полученные на основе анализа кривых деформации

Сплав	Предел текучести, МПа	Сила максимальной нагрузки, МПа	Напряжение, %
TNM	837	1259	12
	865	1359	12
	815	1321	12
Средний	839	1313	12
Стандартное отклонение, %	3.0	3.8	0
TNM+ Cr	788	1261	12
	786	1294	12
	788	1258	12
Средний	787	1271	12
Стандартное отклонение, %	0.14	1.57	0

Следует отметить низкую статичность разрыва предела текучести, что является следствием ГИП-обработки. В исследовании установлено снижение на 6% предела текучести сплава TNM + Cr по сравнению с сплавом TNM. Это связано с наличием значительных количеств глобулярных  $\gamma$ -зерен в структуре сплава TNM + Cr после обработки ГИП стабилизующего отжига.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н.А. Белов, И.С. Чупахин. Количественный анализ фазового состава сплава TNM-B1 на основе алюминидов титана TiAl( $\gamma$ ), *Металловедение и термическая обработка металлов*, 2013. № 9. – С.32-37.

2. Thomas Schmoelzer, Klaus-Dieter Liss, Gerald A. Zickler, Ian J. Watson, Laura M. Droessler, Wilfried Wallgram, Thomas Buslaps, Andrew Studer, Helmut Clemens. Phase fractions, transition and ordering temperatures in Ti-Al-Nb-Mo alloys: An in- and ex-situ study // *Intermetallics* 18. 2010. P. 1544-1552.

3. Белов Н.А., Белов В.Д. Анализ формирования литой микроструктуры гамма (TiAl) – сплава TNM-B1 // *Литейщик России*. – 2012. – N 6. – с. 43-46.

4. Si-Young Sung, Young-Jig Kim Modeling of titanium aluminides turbo-charger casting // *Intermetallics*. – 2007. – 4 : Vol. 15. – P. 468–474.

5. Lin J.P., Zhao L.L., Li G.Y., Zhang L.Q., Song X.P., Ye F., Chen G.L. Effect of Nb on oxidation behavior of high Nb containing TiAl alloys // *Intermetallics*. – 2011. – 2: Vol. 19. – P. 131-136.

6. Белов Н.А. Диаграммы состояния тройных и четверных систем (учебное пособие для вузов) - М.: МИСиС, 2007. – С. 360.

7. Gruters J., Galetz M.C. Influence of thermodynamic activities of different master alloys in pack powder mixtures to produce low activity aluminide coating on TiAl alloys // 2015. V 60. P. 19-27.

8. Datta P.K., Du H.L., Burnell-Gray J.S., Ricker R.E. Corrosion of intermetallics // *Corrosion Materials*. – USA : ASM Handbook, 2005. – Vol. 13B. – p. 490-512.

9. Goral M., Swadzba L., Moskal G., Jarczyk G., Aguilar J. Diffusion aluminide coatings for TiAl intermetallic turbine blades // *Intermetallics*. – 2011. - 5 - Vol. 19. - P. 744-747.

10. Терликбаева А.Ж., Алимжанова А.М., Шаяхметова Р.А., Смагулов Д.У., Осипов П.А. Исследование влияния алюминия на фазовый состав гамма-сплавов системы Ti-Al-Nb-Mo // *Физика металлов и металловедение*. 2017. Т. 118. № 11. С. 1155-1163.

11. Терликбаева А.Ж., Шаяхметова Р.А., Майлыбаева А.Д. // Анализ фазового состава структуры и свойства гамма сплавов на основе алюминидов титана. *Промышленность Казахстана*, 2015. - № 10. - С. 69-72.

## MECHANICAL PROPERTIES OF SYSTEM ALLOYS SYSTEM Ti-Al-Nb-Mo, Ti-Al-Nb-Mo-Cr

\*Alimzhanova A.M.<sup>1,2</sup> Terlikbaeva A.Zh.<sup>1</sup>, Shayakhmetova R.A.<sup>1</sup>,  
ORCID: 0000-0001-6098-7626      0000-0002-2537-897X      0000-0003-2265-2125  
Smagulov D.U.<sup>1</sup>, Belov N.A.<sup>3</sup>  
0000-0002-0599-8741

<sup>1</sup> “National Center for Complex Processing of Mineral Raw Materials” RSE,  
Almaty, Kazakhstan, \*aliyuchca@mail.ru;

<sup>2</sup> “Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpaev, NJSC,  
Almaty, Kazakhstan;

<sup>3</sup> “Moscow Institute of Steel and Alloys” NRTU, Moscow, Russia

**Abstract.** *The results of studies of the mechanical properties of gamma alloys of the Ti-Al-Nb-Mo, Ti-Al-Nb-Mo-Cr systems are presented. The decrease in 6% of the yield stress of the TNM-Cr system alloy as compared to the TNM alloy after hot isothermal pressing at 1250 °C and stabilizing annealing at 800 °C.*