

С. В. Гайдук /к. т. н./

Т. В. Тихомирова

Запорожский национальный технический университет (ЗНТУ), г. Запорожье, Украина  
ГП «Ивченко-Прогресс», г. Запорожье, Украина  
e-mail: gayduksv@gmail.com

## Автоматизированное проектирование литейного жаропрочного коррозионностойкого никелевого сплава для направленной (моно) кристаллизации отливок с требуемыми свойствами

S. V. Gayduk /Cand. Sci. (Tech.)/

Т. В. Тыхомирова

Zaporizhzhya national technical university (ZNTU), Zaporizhzhay, Ukraine  
SE «Ivchenko-Progress», Zaporizhzhay, Ukraine  
e-mail: gayduksv@gmail.com

### Automated design of high-temperature corrosion-resistant nickel-base cast alloy used for directional crystallization with the required characteristics

**Цель.** Проектирование литейного коррозионностойкого сплава на никелевой основе с повышенной жаропрочностью  $\sigma_{40}^{975} = 260$  Мпа.

**Методика.** Сплав разработан по алгоритму комплексной расчетно-аналитической методике (КРАМ) с учетом параметров структурной стабильности  $Nv$ ,  $Md_v$ ,  $Md_c$  и  $\Delta E$ .

**Результаты.** Спроектирован новый литейный жаропрочный коррозионностойкий никелевый сплав ЗМИ-ЗУ-М1 для изготовления турбинных лопаток методом высокоскоростной направленной кристаллизации (ВСНК).

**Научная новизна.** Полученный сплав характеризуется высокой коррозионной стойкостью при уровне жаропрочности  $\sigma_{40}^{975} = 260$  Мпа, что соответствует некоррозионностойкому сплаву ЖС26-ВИ

**Практическая значимость.** Возможность повышения рабочих температур газовых турбин. (Ил. 1. Табл. 5. Библиогр.: 5 назв.)

**Ключевые слова:** жаропрочные никелевые сплавы (ЖНС); система легирования; критерии (параметры) работоспособности; оптимизация; регрессионное уравнение (РУ); регрессионная модель (РМ); комплексная расчетно-аналитическая методика (КРАМ).

**Введение.** В настоящее время без применения новых жаропрочных материалов и технологий производства из них деталей невозможно обеспечение повышенного уровня требований к перспективным газотурбинным двигателям (ГТД) и установкам (ГТУ) [1].

**Постановка задачи.** Целью настоящей работы является проектирование с помощью разработанного экспрессного комплексного расчетно-аналитического метода (КРАМ) [2] нового литейного коррозионностойкого ЖНС с повышенными прочностными характеристиками на уровне литейного жаропрочного некоррозионностойкого сплава ЖС26 для изготовления литейных лопаток первой ступени с направленной (моно) структурой турбин типа Д-336 разных модификаций.

Поиск перспективных композиций разрабатываемого сплава проводился по алгоритму компьютерного моделирования методом КРАМ на основе системы легирования промышленного литейного жаропрочного коррозионностойкого никелевого сплава ЗМИ-ЗУ, взятого за прототип, и жаропрочного сплава ЖС26-ВИ, взятого за аналог (табл. 1).

Опираясь на вышеизложенное, были сформулированы исходные условия для проектирования сплава в новой системе многокомпонентного легирования Ni-Co-Cr-Al-Ti-Mo-W-Ta-B-Y-La-C. В табл. 2 приведены контролируемые параметры, закладываемые в расчет для многокритериальной оптимизации состава проектируемого сплава.

**Анализ результатов.** В данной работе представлены результаты компьютерного проекти-

Химический состав промышленных литейных никелевых сплавов ЖС26-ВИ и ЗМИ-3У среднего уровня легирования [2]

Марка сплава	Среднее содержание элементов, % (по массе)											
	C	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Nb	V	Y	B	Ni
ЗМИ-3У	0,11	13,3	5,0	0,8	7,3	3,4	4,8	-	-	0,03	0,015	Осн.
ЖС26-ВИ	0,15	5,0	9,0	1,1	11,7	5,9	1,0	1,6	1,0	-	0,015	Осн.

Таблица 2

Основные параметры для многокритериальной оптимизации состава проектируемого сплава

Контролируемые параметры	Единица измерения	Уровень параметра
Параметр стабильности, $\Pi_{\text{ТТУ}} = \text{Cr} / [\text{Cr} + \text{Mo} + \text{W}]$	-	$0,825 \pm 0,025$
Суммарное количество электронных вакансий в $\gamma$ -тв. p-pe, $\bar{N}_{V\gamma}$	-	$\leq 2,45$
Суммарное количество валентных электронов в $\gamma$ -тв. p-pe, $\bar{M}_{d\gamma}$	-	$\leq 0,93$
Суммарное количество валентных электронов в сплаве, $\bar{M}_{dC}$	-	$0,980 \pm 0,008$
Параметр дисбаланса системы легирования, $\Delta E$	-	$\pm 0,04$
Суммарное содержание $\sum_{\gamma} = (\text{Mo} + \text{W} + \text{Ta} + \text{Re} + \text{Ru})$	%, масс.	$\geq 11,0$
Суммарное содержание $\sum_{\gamma'} = (\text{Al} + \text{Ti} + \text{Nb} + \text{Ta} + \text{Hf})$	%, масс.	$\geq 11,0$
Температура солидус, $t_s$	$^{\circ}\text{C}$	$\geq 1290^{\circ}\text{C}$
Температурный интервал кристаллизации, $\Delta t_{\text{кр}}$	$^{\circ}\text{C}$	$\leq 80$
Температурный интервал для гомогенизации, $\Delta t_{\text{ГОМ}}$	$^{\circ}\text{C}$	$\geq 20^{\circ}\text{C}$
Количество упрочняющей $\gamma'$ -фазы (20 $^{\circ}\text{C}$ ), $V_{\gamma'}^{20}$	%, масс.	$\geq 60$
Размерное несоответствие решеток $\gamma$ - и $\gamma'$ - (мисфит), $\delta$	%	0,15-0,45
Предел кратковременной прочности (20 $^{\circ}\text{C}$ ), $\sigma_B^{20}$	МПа	$\geq 950$
Относительное удлинение (20 $^{\circ}\text{C}$ ), $\delta^{20}$	%	$\geq 5,0$
Длительная прочность $\tau_{\text{РАЗР}}, \sigma_{260}^{975}$	час.	$\geq 40$
Параметр коррозии, $\Pi_{\text{КС}} = \sqrt{\text{Cr} \times [\text{Ti} / \text{Al}]}$	-	$\geq 3,0$
Уровень выхода годного литья лопаток по макроструктуре	%	На уровне сплава ЖС26-ВИ

рования и экспериментальных исследований нового литейного коррозионностойкого никелевого сплава, обладающего повышенными прочностными характеристиками, а также технологичностью на уровне промышленного сплава ЖС26-ВИ при изготовлении рабочих лопаток первой ступени методом направленной кристаллизации для установок типа Д-336 разных модификаций в условиях промышленного производства ГП «Ивченко-Прогресс».

Следует отметить, что в отличие от более жаропрочного промышленного сплава ЖС26, содержащего (Cr = 5 %; Ti = 1,0 %) и не обладающего коррозионной стойкостью, промышленный коррозионностойкий сплав ЗМИ-3У содержит в составе большее количество (Cr = 13,3 %; Ti = 4,8 %). При этом сплав ЗМИ-3У не обладает требуемым уровнем жаропрочности, так как количество основной упрочняющей  $\gamma'$ -фазы не соответствует условиям ( $V_{\gamma'}^{20} \geq 60$  %).

Указанные в табл. 2 значения характеристик для проектируемого сплава достигались путем многокритериальной оптимизации состава, легированного танталом на основе промышленного литейного жаропрочного коррозионно-

стойкого никелевого сплава ЗМИ-3У, взятого за прототип, с помощью алгоритма разработанного экспресс-метода КРАМ (рис. 1).

В качестве переменных факторов для исследуемых расчетных составов были выбраны следующие варьируемые легирующие элементы (ЛЭ) – новый вводимый элемент тантал (Ta), а также элементы, входящие в состав базового сплава ЗМИ-3У – хром (Cr) и углерод (C). Диапазон варьирования концентраций исследуемых компонентов в выбранной новой системе легирования Ni-Co-Cr-Al-Ti-Mo-W-Ta-Y-B-C задавался в следующих пределах (% по массе): Ta (0,0-5,0) %; Cr (11,0-13,5) %; C (0,04-0,16) %.

В табл. 3 представлены варианты опытных составов 1-5 проектируемого сплава вместе с составами промышленных сплавов ЗМИ-3У и ЖС26 среднего уровня легирования. Композиции составов, которые удовлетворяли условиям:  $\Pi_{\text{ТТУ}} = 0,80-0,85$ ;  $\bar{N}_{V\gamma} \leq 2,45$  и  $\bar{M}_{d\gamma} \leq 0,93$ ;  $-0,04 \leq \Delta E \leq +0,04$  и  $0,972 \leq \bar{M}_{dC} \leq 0,988$ , считались фазово-стабильными.

Из табл. 3 видно, что опытные составы 1-4, а также промышленные сплавы ЖС26 и ЗМИ-3У сбалансированы с точки зрения условий дис-



Рис. 1. Алгоритм компьютерного расчета проектируемого сплава ЗМИ-3У-М1 по разработанной методике КРАМ [2-4]

баланса легирования  $\Delta E = \pm 0,04$ . Величина дисбаланса системы легирования  $\Delta E$  в опытных составах 1-4 находится в пределах от +0,0054 до -0,0400, что удовлетворяет условиям сбалансированного легирования. Вместе с тем величина дисбаланса системы легирования состава 5 ( $\Delta E = -0,0856$ ) не удовлетворяет условиям сбалансированного легирования состава.

Необходимыми структурными и физическими факторами, обеспечивающими требуемый уровень жаропрочности в температурном интервале 800-1000 °С, являются величина объемной доли  $\gamma'$ -фазы, которая должна быть  $V_{\gamma'}^{20} \geq 60$  % по массе, а также мисфит-фактор, величина которого должна находиться в пределах  $\delta = 0,15-0,45$  %.

С учетом сравнительного анализа полученных данных по группам расчетных харак-

теристик для опытных композиций, путем многокритериальной оптимизации состава по контролируемым параметрам (табл. 2), для дальнейших экспериментальных исследований был выбран опытный состав 4 (табл. 3), с присвоением обозначения марки ЗМИ-3У-М1.

Экспериментальные исследования осуществлялись на образцах тестовых плавок по заданным параметрам в соответствии с табл. 2. Химический состав оптимального уровня легирования спроектированного сплава ЗМИ-3У-М1 приведен в табл. 4.

Благодаря многокритериальной оптимизации состава на основе расчетных и экспериментальных исследований спроектированный сплав ЗМИ-3У-М1 при заданных условиях проектирования обеспечивает необходимый уровень требуемых параметров и характеристик.

Таблица 3

Влияние варьирования легирующими элементами в базовом составе промышленного сплава ЗМИ-3У на параметры структурной стабильности

№ состава	Варьирование элементами, % по массе			Количество, % масс.	Мисфит, %	Параметры структурной стабильности				
	С	Ta	Cr			$V_{\gamma'}^{20}$	$\delta$	$\Pi_{\text{гпу}}$	$Nv_{\gamma}$	$Md_{\gamma}$
ЗМИ-3У	0,12	-	13,5	50,9	0,207	0,8419	2,2801	0,9164	0,9870	+0,0356
1	0,12	1,0	13,0	53,9	0,230	0,8434	2,2846	0,9168	0,9813	+0,0054
2	0,10	2,0	12,5	57,0	0,275	0,8381	2,2941	0,9178	0,9772	-0,0167
3	0,08	3,0	12,0	59,9	0,318	0,8325	2,3036	0,9187	0,9729	-0,0393
<b>4</b>	<b>0,06</b>	<b>4,0</b>	<b>11,5</b>	<b>62,6</b>	<b>0,359</b>	<b>0,8265</b>	<b>2,3016</b>	<b>0,9185</b>	<b>0,9728</b>	<b>-0,0400</b>
5	0,04	5,0	11,0	65,0	0,399	0,8200	2,3241	0,9207	0,9642	-0,0856
ЖС26-ВИ	0,16	-	5,0	61,9	0,207	0,5614	1,9604	0,8852	0,9835	+0,0168

Таблица 4

Оптимизированный состав спроектированного сплава ЗМИ-3У-М1

Сплав ЗМИ-3У-М1	Содержание основных легирующих элементов %, по массе											
	С	Cr	Co	Al	Ti	W	Mo	Ta	Y	La	B	Ni
	0,06	11,5	5,0	3,5	4,5	7,0	0,8	4,0	0,03	0,01	0,010	Осн.

Сбалансированный состав содержит с указанными пределами легирования оптимальное содержание: Та = (4,0 ± 0,3) %; более низкое содержание Cr = (11,5 ± 0,3) % и С = (0,06 ± 0,02) % по массе, чем у сплава ЗМИ-ЗУ, взятого за прото-

тип; более низкое содержание W = (7,0 ± 0,3) %, чем у сплава ЖС26-ВИ, взятого за аналог.

В табл. 5 представлены сравнительные результаты расчетных и экспериментальных значений характеристик спроектированного сплава

Таблица 5

Сравнительные значения характеристик сплавов [2; 5-7]

Характеристики параметров по группам	Значения характеристик сплавов		
	Сплав-прототип ЗМИ-ЗУ	Спроектированный сплав ЗМИ-ЗУ-М1	Сплав-аналог ЖС26-ВИ
Структурная стабильность: Π <sub>тпу</sub> = 0,825 ± 0,025 $\bar{N}v_{\gamma} \leq 2,45$ $\bar{M}d_{\gamma} \leq 0,93$ $\bar{M}d_c = 0,980 \pm 0,008$ ΔE = ± 0,04	0,8419 2,2801 0,9164 0,9870 +0,0356	0,8265 2,3016 0,9185 0,9728 -0,0400	0,5614 1,9604 0,8852 0,9835 +0,0168
Структурно-фазовые: Σ <sub>γ</sub> ≥ 11 % (по массе) Σ <sub>γ</sub> ≥ 11 % (по массе) V <sub>γ</sub> <sup>20</sup> ≥ 60 % (по массе)	8,2 8,1 48,0-52,0	12,1 11,8 60,5-63,0	8,4 12,8 58,0-62,0
Физические: ρ, г/см <sup>3</sup> мисфит 0,15 ≤ δ ≤ 0,45 %	8,29 0,203	8,46 0,359	8,57 0,213
Температурные: t <sub>л</sub> , °С t <sub>с</sub> ≥ 1290, °С Δt <sub>кр.</sub> ≤ 80, °С t <sub>эвт.</sub> , °С t <sub>н.р.</sub> <sup>γ</sup> , °С t <sub>п.р.</sub> <sup>γ</sup> , °С Δt <sub>том</sub> ≥ 20, °С t <sub>том</sub> <sup>γ</sup> , °С	1343 1245 98 1235 840 1167 68 1180 <sup>0</sup> ± 10 <sup>0</sup>	1365 1305 60 1290 850 1248 42 1250 <sup>0</sup> ± 10 <sup>0</sup>	1383 1310 73 1284 855 1260 24 1265 <sup>0</sup> ± 10 <sup>0</sup>
Коррозионные: Π <sub>кс</sub> ≥ 3,0 V <sub>q</sub> <sup>800</sup> × 10 <sup>-3</sup> , г/м <sup>2</sup> ·с V <sub>q</sub> <sup>850</sup> × 10 <sup>-3</sup> , г/м <sup>2</sup> ·с V <sub>q</sub> <sup>900</sup> × 10 <sup>-3</sup> , г/м <sup>2</sup> ·с V <sub>q</sub> <sup>950</sup> × 10 <sup>-3</sup> , г/м <sup>2</sup> ·с t <sub>крит.</sub> <sup>γ</sup> , °С	5,15 0,014 0,30 1,22 2,29 ~850°	4,24 0,02 0,60 2,50 3,95 ~830°	0,39 1,19 19,7 56,1 71,5 ~590°
Кратковременная прочность: σ <sub>в</sub> <sup>20</sup> ≥ 950 МПа σ <sub>в</sub> <sup>800</sup> , МПа σ <sub>в</sub> <sup>900</sup> , МПа σ <sub>в</sub> <sup>1000</sup> , МПа	840-940 910-955 720-750 -	1090-1220 930-1030 835-900 620-680	860-930 910-1030 850-880 670-690
Длительная прочность: σ <sub>100</sub> <sup>800</sup> , МПа σ <sub>1000</sub> <sup>800</sup> , МПа σ <sub>100</sub> <sup>900</sup> , МПа σ <sub>1000</sub> <sup>900</sup> , МПа σ <sub>100</sub> <sup>1000</sup> , МПа σ <sub>1000</sub> <sup>1000</sup> , МПа σ <sub>260</sub> <sup>975</sup> ≥ 40 часов	450-520 350-390 260-280 140-170 - - -	580-640 460-500 380-400 180-220 180-200 80-90 58-101	580-620 460-500 380-410 220-240 180-200 80-100 67-121
Выход годных лопаток по макроструктуре, %	20-25	48-50	48-50



ЗМИ-3У-М1 по группам параметров: структурная стабильность [2; 3], структурно-фазовые, физические [5], температурные [2], коррозионные и прочностные характеристики [2], в сравнении со значениями аналогичных характеристик для промышленных серийных сплавов ЗМИ-3У и ЖС26-ВИ.

### Выводы

1. Путем многокритериальной оптимизации состава по алгоритму разработанной методики КРАМ спроектирован новый литейный сплав ЗМИ-3У-М1 для изготовления рабочих лопаток первой ступени ТВД с направленной (моно) структурой, обладающий повышенными прочностными характеристиками на уровне промышленного литейного жаропрочного некоррозионностойкого сплава ЖС26-ВИ, а также коррозионной стойкостью на уровне промышленного литейного коррозионностойкого никелевого сплава ЗМИ-3У.

2. Разработанный новый сплав ЗМИ-3У-М1 внедрен в промышленное производство ГП «Ивченко-Прогресс» для изготовления рабочих лопаток первой ступени ТВД с направленной (моно) структурой установки типа Д-336 различных модификаций, взамен широко применяемого некоррозионностойкого промышленного сплава ЖС26-ВИ.

### Библиографический список / References

1. Каблов Е. Н. Литейные жаропрочные сплавы / Е. Н. Каблов // Эффект С. Т. Кишкина: науч.-техн. сб.: к 100-летию со дня рождения С. Т. Кишкина / под общ. ред. Е. Н. Каблова. – М.: Наука, 2006. – 272 с.

Kablov E. N. *Liteynye zharoprochnye splavy*. Effekt S. T. Kishkina: nauch.-tach. sb.: k 100-letiyu S. T. Kishkina. Moscow, Nauka, 2006, 272 p.

2. Гайдук С. В. Комплексная расчетно-аналитическая методика для проектирования литейных жаропрочных никелевых сплавов / С. В. Гайдук // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2015. – № 2. – С. 92-103.

Gayduk S. V. *Kompleksnaay raschetno-analiticheskaay metodika dlay proektirovaniay liteynyh zharoprochnykh nikelevykh splavov*. Novi materialy

i tehnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni. 2015, no. 2, pp. 92-103.

3. Morinaga M. New PHACOMP and its application to alloy design / M. Morinaga, N. Yukawa, H. Adachi, H. Ezaki // *Superalloys 1984* / eds. M. Gell et al. – AIME, 1984. – P. 523-532.

Morinaga M., Yukawa N., Adachi H., Ezaki H. *New PHACOMP and its application to alloy design*. *Superalloys 1984*. AIME, 1984, pp. 523-532.

4. Морозова Г. И. Сбалансированное легирование жаропрочных никелевых сплавов / Г. И. Морозова // *Металлы*. – 1993. – № 1. – С. 38-41.

Morozova G. I. *Sbalansirovannoe legirovanie zharoprochnykh nikelevykh splavov*. *Metally*. 1993, no. 1, pp. 38-41.

5. Saunders N. The Application of CALPHAD Calculations to Ni-Based Superalloys / N. Saunders, M. Fahrman, C. J. Small // *Superalloys 2000* / eds. K. A. Green, T. M. Pollock and R. D. Kissinger. – TMS. – Warrendale. – 2000. – 803 p.

Saunders N., Fahrman M., Small C. J. *The Application of CALPHAD Calculations to Ni-Based Superalloys*. *Superalloys 2000*. TMS. Warrendale. 2000, 803 p.

**Purpose.** Development a high corrosion-resistance Ni-based alloy with the improved high-temperature properties.

**Methodology.** The alloy is developed to accordance of the algorithm of a complex numerical and analytical method (CRAM) and structural parameters of stability  $N_v$ ,  $Md_v$ ,  $Md_c$  и  $\Delta E$ .

**Findings.** There is designed corrosion-resistant superalloy ZMI-3U-M1 to cast turbine blades by directional crystallization (DC).

**Originality.** The developed alloy has high corrosion-resistance and at the same time demonstrates the improved high-temperature properties ( $\sigma_{40}^{975} = 260$  MPa).

**Practical value.** Raise the exploitation temperature of engines.

**Key words:** Nickel-based superalloy (INS); system alloying; criteria (parameters) operation; optimization; regression equation (RU); regression model (RM); integrated calculated-analytical methodology (ICAM).

Рекомендована к публикации  
д. т. н. В. З. Куцовой

Поступила 22.07.2016

Metallurgical and Mining  
Industry

www.metalljournal.com.ua