

С. В. Гайдук /к. т. н./

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

Т. В. Тихомирова

Технологически свариваемый литейный жаропрочный коррозионностойкий никелевый сплав

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

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

Т. В. Тыхомырова

Operative-weldable corrosion-resistant nickel-based cast superalloy

Цель. Обеспечение технологической свариваемости и коррозионной стойкости жаропрочного никелевого сплава при сохранении уровня жаропрочности $\sigma_{40}^{975} = 180\text{--}200$ МПа.

Методика. Сплав разработан по алгоритму комплексной расчетно-аналитической методике (КРАМ) с учетом параметров структурной стабильности Nv_{γ} , Md_{γ} , Md_C и ΔE .

Результаты. Спроектирован новый литейный жаропрочный коррозионностойкий никелевый сплав ЖСЗЛС-М.

Научная новизна. Полученный сплав характеризуется высокой коррозионной стойкостью и технологической свариваемостью при уровне жаропрочности $\sigma_{40}^{975} = 180$ МПа.

Практическая значимость. Возможность ремонта производственных дефектов деталей из сплава ЖСЗЛС-М сваркой, использование сплава ЖСЗЛС-М в качестве присадочного материала, получение деталей сложной конфигурации. (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. Одним из перспективных направлений повышения эксплуатационных характеристик ответственных деталей ГТД является получение цельнолитых сопловых аппаратов (СА) из новых литейных коррозионностойких жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС), обладающих одновременно технологической свариваемостью и повышенными прочностными характеристиками, что невозможно обеспечить без применения новых жаропрочных материалов и технологий производства [1]. Под технологической свариваемостью таких сплавов подразумевается возможность устранения литейных дефектов (раковины, поры и др.) на поверхности отливок сваркой или наплавкой.

Постановка задачи. Целью настоящей работы является проектирование с помощью разработанного экспрессного комплексного расчетно-аналитического метода (КРАМ) [2] нового литейного коррозионностойкого ЖНС для изготовления цельнолитых сопловых аппаратов (СА), обладающего технологической свариваемостью на уровне промышленного сплава

ЖСЗЛС и повышенными прочностными характеристиками на уровне сплава ВЖЛ12Э.

Поиск перспективных композиций разрабатываемого сплава проводился по алгоритму компьютерного моделирования методом КРАМ на основе системы легирования промышленного литейного жаропрочного коррозионностойкого никелевого сплава ЖСЗЛС и сплава ВЖЛ12Э, взятого за аналог (табл. 1).

В выбранную базовую систему легирования сплава ЖСЗЛС (Ni-Co-Cr-Al-Ti-Mo-W-Zr-B-C) вводились новые элементы – гафний (Hf) и тантал (Ta), что способствовало:

- увеличению объемной доли основной упрочняющей γ' -фазы и повышению ее термодинамической стабильности;

- положительному влиянию на морфологию карбидной фазы типа MeC , заметному подавлению механизма образования менее термодинамически устойчивых и неблагоприятных по морфологии карбидов типа $Me_{23}C_6$, что способствует увеличению общего запаса пластичности материала;

Химический состав литейных никелевых сплавов ЖСЗЛС и ВЖЛ12Э среднего уровня легирования [2]

Марка сплава	Среднее содержание элементов, % (по массе)											
	C	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Nb	V	Zr	B	Ni
ЖСЗЛС	0,09	16,0	5,0	4,0	4,0	2,7	2,7	-	-	0,015	0,015	Осн.
ВЖЛ12Э	0,16	9,25	9,0	3,1	1,4	5,4	4,5	0,75	0,75	0,020	0,015	Осн.

- значительному повышению температуры полного растворения основной упрочняющей γ' -фазы, следовательно, увеличению ее остаточного количества при высоких температурах, что способствует повышению характеристик жаропрочности, особенно длительной прочности.

В табл. 2 приведены основные контролируемые параметры, закладываемые в расчет для многокритериальной оптимизации состава разрабатываемого сплава.

Анализ результатов. Для многокритериальной оптимизации состава проектируемого сплава были сформулированы следующие требования и выбраны основные контролируемые параметры структурной стабильности, закладываемые в комплексный расчет:

- выполнение условий структурной стабильности по параметрам: $\Pi_{\text{ТПУ}} = \text{Cr} / [\text{Cr} + \text{Mo} + \text{W}] = 0,825 \pm 0,025$; $Nv_{\gamma} \leq 2,45$, $Md_{\gamma} \leq 0,93$, $\Delta E = \pm 0,04$, $Md_c = 0,980 \pm 0,008$;

- обеспечение технологической свариваемости на уровне сплава ЖСЗЛС, взятого за прототип, а также прочностных характеристик, близких к уровню промышленного литейно-

го жаропрочного сплава ВЖЛ12Э, взятого за аналог: контролируемое количество основной упрочняющей γ' -фазы в пределах $43 < V_{\gamma}^{20} < 50\%$ (по массе); кратковременная прочность $\sigma_B^{20} \geq 850$ МПа; $\delta^{20} \geq 5,0\%$ и длительная прочность $\sigma_{180}^{975} \geq 40$ часов в соответствии с техническими условиями (ТУ);

- обеспечение коррозионных параметров на уровне промышленного литейного коррозионно-стойкого сплава ЖСЗЛС, взятого за прототип: параметр коррозионной стойкости $\Pi_{\text{КС}} = \sqrt{\text{Cr}} \times [\text{Ti} / \text{Al}] \geq 3,0$.

Указанные в табл. 2 значения характеристик для разрабатываемого сплава, достигались путем многокритериальной оптимизации состава, легированного гафнием и танталом на основе промышленного сплава ЖСЗЛС, взятого за прототип, с помощью алгоритма разработанного экспресс-метода КРАМ (рис. 1). К концептуально новому подходу в сбалансированности легирования литейных ЖНС можно отнести следующие положения:

- для обеспечения работоспособности проектируемого сплава необходимо сбалансиро-

Таблица 2

Основные параметры структурной стабильности для многокритериальной оптимизации состава проектируемого сплава

Контролируемые параметры структурной стабильности	Единица измерения	Уровень параметра
Параметр стабильности, $\Pi_{\text{ТПУ}} = \text{Cr} / [\text{Cr} + \text{Mo} + \text{W}]$	-	$0,825 \pm 0,025$
Суммарное количество электронных вакансий в γ -твердом растворе, Nv_{γ}	-	$\leq 2,45$
Суммарное количество валентных электронов в γ -твердом растворе, $\bar{M}d_{\gamma}$	-	$\leq 0,93$
Суммарное количество валентных электронов в сплаве, $\bar{M}d_c$	-	$0,980 \pm 0,008$
Параметр дисбаланса системы легирования, ΔE	-	$\pm 0,04$
Суммарное содержание $\sum_{\gamma} = (\text{Mo} + \text{W} + \text{Ta} + \text{Re} + \text{Ru})$	%, масс.	$\geq 10,0$
Суммарное содержание $\sum_{\gamma'} = (\text{Al} + \text{Ti} + \text{Nb} + \text{Ta} + \text{Hf})$	%, масс.	$8,0 \leq \sum_{\gamma'} \leq 9,0$
Температура солидус, t_s	$^{\circ}\text{C}$	$\geq 1280^{\circ}\text{C}$
Температурный интервал гомогенизации, $\Delta t_{\text{ГОМ}}$	$^{\circ}\text{C}$	$\geq 20^{\circ}\text{C}$
Количество упрочняющей γ' -фазы (20°C), V_{γ}^{20}	%, мас.	$43 < V_{\gamma}^{20} < 50$
Размерное несоответствие решеток γ - и γ' - (мисфит), δ	%	$0,15-0,45$
Предел кратковременной прочности (20°C), σ_B^{20}	МПа	≥ 850
Относительное удлинение (20°C), δ^{20}	%	$\geq 5,0$
Длительная прочность $t_{\text{РАЗР}} \sigma_{180}^{975}$	Час.	≥ 40
Параметр коррозии, $\Pi_{\text{КС}} = \sqrt{\text{Cr}} \times [\text{Ti} / \text{Al}]$	-	$\geq 3,0$
Устранение литейных дефектов на цельнолитых СА методом аргонодуговой сварки (АДС)	Технологическая свариваемость на уровне сплава ЖСЗЛС	



Рис. 1. Алгоритм компьютерного расчета проектируемого сплава ЖСЗЛС-М по разработанной методике КРАМ

вать общий химический состав сплава: по γ' -образующим элементам в пределах $\sum_{\gamma'} = (Al + Ti + Nb + Ta + Hf) = 8-9\%$ по массе; по элементам упрочняющим γ -твердый раствор $\sum_{\gamma} = (Mo + W + Ta + Re + Ru) \geq 10\%$ по массе;

- для обеспечения требуемого уровня прочностных характеристик необходимо повышение величины мисфит-фактора δ , т. е. увеличение размерного несоответствия периодов кристаллических решеток γ' -фазы и γ -твердого раствора, что достигается введением в новую систему легирования разрабатываемого сплава оптимального количества Hf и Ta;

- введение в систему легирования проектируемого сплава оптимального количества Hf (0,3 %) и Ta (2,5 %) при снижении Cr с 16 до 14,5 %, а также повышении в базовой системе легирования сплава ЖСЗЛС нижней границы легирования по Al с 2,5 до 3,2 % и по W с 3,5 до 6,2 %, а также снижение верхней границы легирования Mo с 4,5 до 2,5 % по массе обеспечит необходимый уровень технологических и коррозионных характеристик при повышении температурного уровня прочностных характеристик.

В качестве переменных факторов для исследуемых расчетных составов были выбраны следующие варьируемые легирующие элементы (ЛЭ) – новые вводимые элементы гафний (Hf) и тантал (Ta), а также элементы, входящие в состав базового сплава ЖСЗЛС – хром (Cr), вольфрам (W) и молибден (Mo). Диапазон варьирования концентраций исследуемых легирующих элементов в выбранной новой системе легирования Ni-Co-Cr-Al-Ti-Mo-W-Ta-Hf-Zr-B-C задавался в следующих пределах (% по массе): Hf (0,0–0,5) %; Ta (0,0–3,5) %; W (4,0–7,5) %; Mo (1,0–4,0) %; Cr (13,5–16,0) %.

Изначально в компьютерном эксперименте проводилась оценка структурной стабильности расчетных составов в заданном диапазоне варьирования указанными элементами по параметрам \bar{N}_{γ} , $\bar{M}_{d,\gamma}$, \bar{M}_{d_c} и ΔE , как традиционными методами по известным регрессионным уравнениям (РУ) [3; 4], так и по математическим регрессионным моделям (РМ) в соответствии с алгоритмом (рис. 1), разработанной методикой КРАМ [1, с. 5–7].

В табл. 3 представлены опытные варианты составов 1–5 проектируемого сплава вместе с составами промышленных сплавов ЖСЗЛС и ВЖЛ12Э среднего уровня легирования. Композиции составов, которые удовлетворяли условиям: $P_{ппу} = 0,80-0,85$; $\bar{N}_{\gamma} \leq 2,45$ и $\bar{M}_{d,\gamma} \leq 0,93$; $-0,04 \leq \Delta E \leq +0,04$ и $0,972 \leq \bar{M}_{d_c} \leq 0,988$, считались фазово-стабильными. Расчеты параметров структурной стабильности \bar{N}_{γ} , $\bar{M}_{d,\gamma}$, ΔE , \bar{M}_{d_c} проводились путем перевода химических составов γ -твердых растворов и общих составов в ат. %.

Из табл. 3 видно, что опытные составы 1–5, а также промышленный сплав ВЖЛ12Э сбалансированы с точки зрения условий дисбаланса легирования $\Delta E = \pm 0,04$. Величина дисбаланса системы легирования ΔE в опытных составах 1–5 находится в пределах от +0,0111 до +0,0289, что удовлетворяет условиям сбалансированного легирования.

Следует отметить, что величина дисбаланса системы легирования базового промышленного сплава ЖСЗЛС, взятого за прототип, не удовлетворяет условиям сбалансированного легирования химического состава ($\Delta E = +0,1372$). При этом сплав ЖСЗЛС технологически свариваемый, так как количество основной упрочняющей γ' -фазы соответствует условию

Влияние варьирования легирующими элементами в базовом составе промышленного сплава ЖСЗЛС на параметры структурной стабильности

№ состава	Варьирование элементами %, по массе				Количество, % (масс.) V_{γ}^{20}	Мисфит, % Δ	Параметры структурной стабильности				
	Hf	Ta	Cr	W/Mo			$P_{\text{шп}}^{\text{шп}}$	$\bar{N}_{V_{\gamma}}$	$\bar{M}_{d_{\gamma}}$	\bar{M}_{d_c}	ΔE
ЖСЗЛС	-	-	16,0	1,00	40,6	0,171	0,8290	2,2141	0,9100	1,0061	+0,1372
1	0,1	1,5	15,5	1,83	45,9	0,290	0,8297	2,2597	0,9144	0,9857	+0,0289
2	0,2	2,0	15,0	2,40	47,2	0,338	0,8309	2,2593	0,9143	0,9850	+0,0250
3	0,3	2,5	14,5	3,25	48,6	0,377	0,8322	2,2566	0,9141	0,9840	+0,0200
4	0,4	3,0	14,0	4,67	50,0	0,404	0,8337	2,2510	0,9134	0,9832	+0,0156
5	0,5	3,5	13,5	7,50	51,3	0,412	0,8352	2,2489	0,9134	0,9824	+0,0111
ВЖЛ12Э	-	-	9,25	0,45	60,8	0,151	0,8172	2,2287	0,9114	0,9847	+0,0235

($V_{\gamma}^{20} = 40,6 < 50$ %), в отличие от более жаропрочного сплава ВЖЛ12Э ($V_{\gamma}^{20} = 60,8$ %), не обладающего технологической свариваемостью. Вместе с тем сплав ЖСЗЛС не обладает требуемым уровнем жаропрочности, так как количество основной упрочняющей γ' -фазы не соответствует условиям ($43 < V_{\gamma}^{20} < 50$ %).

При выборе оптимальной композиции проектируемого сплава для изготовления цельнолитых сопловых аппаратов, обладающего технологической свариваемостью, показано, что структурная стабильность является необходимым, но не достаточным условием для достижения требуемых показателей жаропрочности. Необходимыми структурными и физическими факторами, обеспечивающими требуемый уровень жаропрочности в температурном интервале 800–1000 °С, является величина объемной доли γ' -фазы, которая должна находиться в контролируемых пределах ($43 < V_{\gamma}^{20} < 50$ %) по массе, а также мисфит-фактор, который должен находиться в пределах ($0,15 \leq \delta \leq 0,45$ %).

Путем многокритериальной оптимизации состава по контролируемым параметрам (табл. 2) для дальнейших экспериментальных исследований был выбран опытный состав 3 (см. табл. 3) с присвоенным обозначением марки ЖСЗЛС-М. Экспериментальные исследования осуществлялись на опытных образцах тестовых и промышленных плавок по заданным параметрам в соответствии с табл. 2. Химический состав оптимального уровня легирования спроектированного сплава ЖСЗЛС-М приведен в табл. 4.

В табл. 5 представлены результаты расчетных и экспериментальных значений характеристик

спроектированного сплава ЖСЗЛС-М по группам параметров: структурная стабильность [2; 3], структурно-фазовые [5], физические [5], температурные [2], коррозионные и прочностные характеристики [2], в сравнении с аналогичными характеристиками для промышленных сплавов ЖСЗЛС и ВЖЛ12Э.

Выводы

1. По алгоритму методики КРАМ, спроектирован новый литейный технологически свариваемый жаропрочный коррозионностойкий сплав ЖСЗЛС-М для изготовления цельнолитых СА разных ступеней, обладающий повышенными прочностными характеристиками на уровне промышленного жаропрочного несвариваемого и некоррозионностойкого сплава ВЖЛ12Э, обладающего коррозионной стойкостью и технологической свариваемостью на уровне промышленного литейного свариваемого жаропрочного коррозионностойкого никелевого сплава ЖСЗЛС.

2. Спроектированный новый сплав ЖСЗЛС-М технологически опробован и внедрен в промышленное производство АО «Мотор Сич» для изготовления цельнолитых сопловых аппаратов типа ТВ3-117 разных ступеней, взамен широко применяемого промышленного серийного сплава ВЖЛ12Э.

Библиографический список / References

1. Гайдук С. В. Сравнительные исследования свариваемости литейных жаропрочных никелевых сплавов / С. В. Гайдук, И. А. Петрик, В. В. Кононов // Нові матеріали і технології в

Оптимизированный состав спроектированного сплава ЖСЗЛС-М

Сплав ЖСЗЛС-М	Содержание основных легирующих элементов %, по массе											
	C	Cr	Co	Al	Ti	W	Mo	Ta	Hf	Zr	B	Ni
	0,10	14,5	4,5	3,0	3,0	6,5	2,0	2,5	0,3	0,015	0,015	Осн.

Сравнительные значения характеристик сплавов

Характеристики параметров по группам	Значения характеристик сплавов		
	Сплав-прототип ЖСЗЛС	Спроектированный сплав ЖСЗЛС-М	Сплав-аналог ВЖЛ12Э
Структурная стабильность: $\Pi_{\text{ПВ}} = 0,825 \pm 0,025$ $\bar{N}_{V\gamma} \leq 2,45$ $\bar{M}_{d\gamma} \leq 0,93$ $\bar{M}_{dC} = 0,980 \pm 0,008$ $\Delta E = \pm 0,04$	0,8290 2,2141 0,9100 1,0061 +0,1372	0,8323 2,2566 0,9141 0,9840 +0,0200	0,8175 2,2287 0,9114 0,9847 +0,0235
Структурно-фазовые: $43 < V_{\gamma} < 50$ % (по массе)	38,0-42,0	43,5-49,5	58,0-64,0
Физические: $\rho, \text{ г/см}^3$ мисфит $0,15 \leq \delta \leq 0,45$ %	8,33 0,171	8,47 0,377	7,93 0,151
Температурные: $t_L, ^\circ\text{C}$ $t_S \geq 1280, ^\circ\text{C}$ $\Delta t_{\text{КР}}, ^\circ\text{C}$ $t_{\text{ЭВЛ}}, ^\circ\text{C}$ $t_{\text{Н.П.}}, ^\circ\text{C}$ $t_{\text{П.П.}}, ^\circ\text{C}$ $\Delta t_{\text{ГОМ}}, ^\circ\text{C}$ $t_{\text{ГОМ}}, ^\circ\text{C}$	1354 1260 94 1188 835 1090 98 1150° ± 10°	1355 1290 65 1220 850 1160 60 1190° ± 10°	1334 1273 61 1229 851 1222 7 без ТО
Коррозионные: $\Pi_{\text{КС}} \geq 3,0$ $V_q^{800} \times 10^3, \text{ г/м}^2 \cdot \text{с}$ $V_q^{850} \times 10^3, \text{ г/м}^2 \cdot \text{с}$ $V_q^{900} \times 10^3, \text{ г/м}^2 \cdot \text{с}$ $V_q^{950} \times 10^3, \text{ г/м}^2 \cdot \text{с}$ $t_{\text{КРИТ.}}, ^\circ\text{C}$	4,00 0,04 0,82 3,07 5,24 ~825°	3,81 0,04 0,90 3,50 5,90 ~820°	2,54 0,16 2,96 9,92 15,05 ~770°
Кратковременная прочность: $\sigma_B^{20} \geq 850$ МПа $\sigma_B^{800}, \text{ МПа}$ $\sigma_B^{900}, \text{ МПа}$ $\sigma_B^{1000}, \text{ МПа}$	740-770 620-650 520-600 -	930-975 911-956 849-854 500-563	910-975 880-1000 850-870 500-580
Длительная прочность: $\sigma_{100}^{800}, \text{ МПа}$ $\sigma_{1000}^{800}, \text{ МПа}$ $\sigma_{100}^{900}, \text{ МПа}$ $\sigma_{1000}^{900}, \text{ МПа}$ $\sigma_{100}^{1000}, \text{ МПа}$ $\sigma_{1000}^{1000}, \text{ МПа}$ $\sigma_{180}^{975} \geq 40$ часов	380-400 - 180-200 - - - -	480-500 350-370 280-300 170-190 110-130 70-80 44-68	480-530 370-420 270-305 180-205 120-145 75-90 68-127
Устранение литейных дефектов на цельнолитых СА методом АДС	Обладает технологической свариваемостью	Обладает технологической свариваемостью	Не обладает технологической свариваемостью

металургії та машинобудуванні. – 2015. – № 1. – С. 82–88.

Gayduk S. V., Petrik I. A., Kononov V. V. *Sravnitelnye issledovaniya svarivaemosti liteynykh zharoprochnykh nikelovykh splavov. Novi materialy I tehnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni.* 2015, no. 1, pp. 82-88.

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 liteynykh zharoprochnykh nikelovykh 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. Компенсация дисбаланса легирования жаропрочных никелевых сплавов / Г. И. Морозова // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2012. – № 12 (690). – С. 52–56.

Morozova G. I. *Kompensatsiay disbalansa legirovaniay zharoprochnykh nikelovykh splavov.* *Metallovedenie I termicheskaya obrabotka metallov.* 2012, no. 12, pp. 52-56.

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 ΔE .

Findings. There is designed corrosion-resistant superalloy ZHS3LS-M exhibiting high-temperature strength $\sigma_{40}^{975} = 180\text{--}200$ MPa, to be commensurate with high-temperature strength of noncorrosion-resistant and weldability.

Originality. The alloy has a higher corrosion resistance and weldability characteristics keeping high-temperature strength $\sigma_{40}^{975} = 180\text{--}200$ MPa.

Practical value. It being used for casting the block nozzle and vane of engine turbine.

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

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

Поступила 22.07.2016

**Metallurgical and Mining
Industry**

www.metaljournal.com.ua