

# АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВА ТЕХНОЛОГИЧНОГО ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЦЕЛЬНОЛИТЫХ СОПЛОВЫХ АППАРАТОВ

С. В. ГАЙДУК<sup>1</sup>, В. В. КОНОНОВ<sup>1</sup>, В. В. КУРЕНКОВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Запорожский нац. технический университет (ЗНТУ).

69063, г. Запорожье, ул. Жуковского, 64. E-mail: rector@zntu.edu.ua

<sup>2</sup>ООО «Патон Турбайн Текнолоджиз». 036028, г. Киев, ул. Ракетная, 26. E-mail: VKurenkova@patontt.com

По алгоритму разработанной комплексной расчетно-аналитической методики спроектирован новый литейный жаропрочный коррозионностойкий никелевый сплав ЖСЗЛС-М для изготовления цельнолитых сопловых аппаратов, имеющий жаропрочность  $\sigma_{40}^{975} = 180...200$  МПа на уровне промышленного жаропрочного некоррозионностойкого сплава ВЖЛ12Э, а также технологическую свариваемость и коррозионную стойкость на уровне промышленного свариваемого коррозионностойкого сплава ЖСЗЛС. Библиогр. 24, табл. 11, рис. 1.

*Ключевые слова:* литейные жаропрочные никелевые сплавы, параметры работоспособности; комплексная расчетно-аналитическая методика, регрессионная модель, регрессионное уравнение, служебные свойства; свариваемость

В настоящее время без применения новых жаропрочных материалов и технологий производства из них деталей газотурбинных двигателей (ГТД) невозможно обеспечить повышенный уровень требований к перспективным ГТД. Поэтому одним из прогрессивных направлений повышения эксплуатационных характеристик ответственных деталей ГТД является получение цельнолитых сопловых аппаратов (СА) из новых литейных коррозионностойких жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС), характеризующихся одновременно технологической свариваемостью и повышенными прочностными характеристиками [1–6].

К наиболее известным литейным ЖНС, широко применяемым для изготовления цельнолитых СА различного типа, относятся промышленные сплавы ЖСЗЛС и ВЖЛ12Э. Сплав ВЖЛ12Э, легированный алюминием в количестве 5,0...5,7 мас. %, в котором объемная доля  $\gamma'$ -фазы достигает 58...62 %, имеет повышенную термическую стабильность структурно-фазового состава. Это обеспечивает более высокую жаропрочность и лучшее сопротивление высокотемпературной ползучести материала до 1000 °С по сравнению со сплавом ЖСЗЛС, легированным алюминием в количестве 2,4...3,0 мас. %, в котором объемная доля  $\gamma'$ -фазы составляет всего 38...42 %. Однако сплав ВЖЛ12Э не отличается технологической свариваемостью и необходимой коррозионной стойкостью, что делает дальнейшее его применение не особо перспективным. Указанными характеристиками отличается промышленный сплав ЖСЗЛС,

однако он не характеризуется требуемым уровнем прочности, что также ограничивает его применение для перспективных ГТД [6–11].

Следовательно, проектирование и внедрение в промышленность новых литейных коррозионностойких ЖНС, отличающихся технологической свариваемостью и повышенным уровнем жаропрочности, является актуальным, конкурентоспособным и экономически выгодным направлением для изготовления цельнолитых сопловых аппаратов перспективных ГТУ с помощью разработанного экспрессного метода компьютерного проектирования, заменившего малоэффективный эмпирический метод «проб и ошибок».

**Постановка задачи.** Сварка/наплавка жаропрочных никелевых сплавов является довольно сложным процессом ввиду наличия в них большого количества основной упрочняющей фазы  $\gamma'$  —  $\text{Ni}_3\text{Al}$  (более 60 об. %). Именно выделение данной фазы в процессе кристаллизации или последующей термообработки приводит к возникновению в швах или зонах термического влияния трещин дисперсионного твердения [11].

Целью настоящей работы является проектирование с помощью разработанного экспрессного комплексного расчетно-аналитического метода (КРАМ) [12] нового литейного коррозионностойкого ЖНС для изготовления цельнолитых сопловых аппаратов (СА) разных типов, отличающихся технологической свариваемостью на уровне промышленного сплава ЖСЗЛС и повышенными прочностными характеристиками на уровне несвариваемого и некоррозионностойкого промышленного сплава ВЖЛ12Э.

Т а б л и ц а 1. Химический состав (мас. %) промышленных литейных никелевых сплавов ЖСЗЛС и ВЖЛ12Э среднего уровня легирования [6, 10]

Марка сплава	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.

Поиск перспективных композиций разрабатываемого сплава проводился по алгоритму компьютерного моделирования методом КРАМ на основе системы легирования промышленного литейного коррозионностойкого никелевого сплава ЖСЗЛС, взятого за прототип, химический состав которого приведен в табл. 1 вместе с составом промышленного жаропрочного сплава ВЖЛ12Э, взятого за аналог.

В выбранную базовую систему легирования сплава ЖСЗЛС (Ni–Co–Cr–Al–Ti–Mo–W–Zr–B–C) вводились новые элементы, такие, как гафний и тантал, что было обусловлено следующим:

тантал и гафний способствуют увеличению объемной доли основной упрочняющей  $\gamma'$ -фазы и повышению ее термодинамической стабильности;

положительно влияют на морфологию карбидной фазы типа MeC, при этом заметно подавляя механизм образования менее термодинамически стабильных и неблагоприятных по морфологии карбидов типа  $Me_{23}C_6$ , что способствует повышению общего запаса пластичности материала;

способствуют значительному повышению температуры полного растворения основной упрочняющей  $\gamma'$ -фазы, а следовательно, увеличению ее остаточного количества при высоких температурах, что обеспечивает повышение характеристик жаропрочности, а следовательно, и длительной прочности.

Опираясь на изложенное выше, были сформулированы исходные условия для проектирования сплава в новой системе многокомпонентного легирования Ni–Co–Cr–Al–Ti–Mo–W–Ta–Hf–Zr–B–C. Ниже приведены основные контролируемые параметры, закладываемые в расчет для многокритериальной оптимизации состава разрабатываемого сплава.

**Основные параметры для многокритериальной оптимизации состава проектируемого сплава:**

Параметр стабильности	
$P_{\text{ТПУ}} = \%Cr / \%(Cr+Mo+W)$ .....	$0,825 \pm 0,025$
Суммарное количество электронных вакансий	
в $\gamma$ -тв. р-ре $N_v$ .....	2,40
Суммарное количество валентных электронов	
в $\gamma$ -тв. р-ре $M_d$ .....	0,93
Суммарное количество валентных электронов	
в сплаве $M_{dC}$ .....	$0,980 \pm 0,008$
Параметр дисбаланса системы легирования $\Delta E$ .....	$\pm 0,04$
Суммарное содержание	
$\Sigma_\gamma = (Mo+W+Ta+Re+Ru)$ , мас. % .....	$\geq 10,0$
Суммарное содержание	
$\Sigma_{\gamma'} = (Al+Ti+Nb+Ta+Hf)$ , мас. % .....	$8,0 < \Sigma_{\gamma'} < 9,0$

Температура солидус $t_s$ , °C .....	$\geq 1280$
Температурный интервал гомогенизации,	
$\Delta t_{\text{гом}}$ , °C .....	$\geq 20$
Количество упрочняющей $\gamma'$ -фазы (20 °C),	
$V_{\gamma'}^{20}$ , об. % .....	$43 < V_{\gamma'}^{20} < 50$
Размерное несоответствие решеток $\gamma$ - и $\gamma'$ - (мисфит)	
$\delta$ , % .....	$0,15 \dots 0,45$
Предел кратковременной прочности (20 °C),	
$\sigma_B^{20}$ , МПа .....	$\geq 850$
Относительное удлинение (20 °C) $\delta^{20}$ , % .....	$\geq 5,0$
Длительная прочность $\tau_{\text{разр}}$ , $\sigma_{180}^{975}$ , ч .....	$\geq 40$
Параметр коррозии $P_{\text{КС}} = \sqrt[3]{\%Cr\% [Ti/Al]}$ .....	$\geq 3,0$
Критическая температура ускоренной	
ВТК, $t_{\text{крит}}$ , °C .....	$\geq 800$
Устранение литейных дефектов на цельнолитых	
СА методом аргонодуговой сварки (АДС) .....	
..... Технологическая свариваемость	
..... на уровне сплава ЖСЗЛС	

**Анализ результатов.** В данной работе представлены результаты компьютерного проектирования и экспериментальных исследований нового литейного коррозионностойкого никелевого сплава, предназначенного для изготовления цельнолитых СА типа ТВ3-117 в условиях промышленного предприятия ЗМЗ им. В. И. Омельченко, имеющего повышенные прочностные характеристики и технологическую свариваемость. В отличие от более жаропрочного промышленного сплава ВЖЛ12Э, содержащего 9 мас. % Cr и не отличающегося коррозионной стойкостью, промышленный свариваемый коррозионностойкий сплав ЖСЗЛС содержит в составе большее количество хрома (16 мас. %). В свою очередь сплав ЖСЗЛС не имеет требуемый уровень жаропрочности, так как количество основной упрочняющей  $\gamma'$ -фазы составляет всего 38...42 %, что на 20 % меньше, чем у сплава ВЖЛ12Э (58...62)%. Поэтому, для многокритериальной оптимизации состава разрабатываемого сплава были сформулированы следующие требования и выбраны основные контролируемые параметры, закладываемые в комплексный расчет:

– выполнение условий структурной стабильности по параметрам:

$$P_{\text{ТПУ}} = \%Cr / \%(Cr+Mo+W) = 0,825 \pm 0,025;$$

$$N_v \leq 2,40; M_d \leq 0,93; \Delta E = \pm 0,04;$$

$$M_{dC} = 0,980 \pm 0,008;$$

– обеспечение технологической свариваемости на уровне сплава ЖСЗЛС, взятого за прототип, а также прочностных характеристик, близких к уровню промышленного литейного жаропрочного сплава ВЖЛ12Э, взятого за аналог: контролируе-



Рис. 1. Алгоритм компьютерного расчета проектируемого сплава ЖСЗЛС-М по разработанной методике КРАМ [12]

мое количество основной упрочняющей  $\gamma'$ -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  $\sigma_{180}^{975} \geq 40$  ч в соответствии с ОСТ 1.90126-85;

– обеспечение коррозионной стойкости на уровне промышленного литейного коррозионно-стойкого сплава ЖСЗЛС, взятого за прототип: параметр коррозии  $\Pi_{KC} = \%(Ti/Al) \geq 3,0$ .

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

– для обеспечения работоспособности разрабатываемого сплава необходимо сбалансировать общий химический состав сплава: по  $\gamma'$ -образующим элементам в пределах  $\sum_{\gamma'} = \%(Al+Ti+Nb+Ta+Hf) = 8...9$  мас. %; по элементам, упрочняющим  $\gamma'$ -твердый раствор  $\sum_{\gamma'} = \%(Mo+W+Ta+Re+Ru) \geq 10$  мас. %;

– для обеспечения требуемого уровня прочностных характеристик необходимо повысить величину мисфит-фактора  $\delta$  за счет увеличения размерного несоответствия периодов кристаллических решеток  $\gamma'$ -фазы и  $\gamma'$ -твердого раствора. Это достигается введением в новую систему легирования разрабатываемого сплава оптимального количества гафния и тантала, которые положительно влияют на величину мисфит-фактора;

– введение в систему легирования проектируемого сплава оптимального количества гафния (0,3 мас. %) и тантала (2,5 мас. %) при снижении хрома с 16 до 14,5 %, а также повышении в базовой системе легирования сплава ЖСЗЛС нижней границы легирования по алюминию с 2,5 до 3,2 % и по вольфраму с 3,5 до 6,2 мас. %, а также снижение верхней границы легирования по молибдену с 4,5 до 2,5 мас. %, что обеспечит требуемый уровень технологических и коррозионных характеристик, при повышении температурного уровня прочностных характеристик.

В качестве переменных факторов для исследуемых расчетных составов были выбраны такие варьируемые легирующие элементы как гафний и тантал, а также элементы, входящие в состав базового сплава ЖСЗЛС — хром, вольфрам и молибден. Диапазон варьирования концентраций исследуемых легирующих элементов в выбранной новой системе легирования Ni–Co–Cr–Al–Ti–Mo–W–Ta–Hf–Zr–V–C задавался в следующих пределах, мас. %: 0,0...0,5 Hf; 0,0...3,5 Ta; 4,0...7,5 W; 1,0...4,0 Mo; 3,5...16,0 Cr.

Изначально в компьютерном эксперименте проводили оценку структурной стабильности расчетных составов в заданном диапазоне варьирования указанными элементами по параметрам  $N_{v\gamma}$ ,  $M_{d\gamma}$ ,  $M_{dc}$  и  $\Delta E$  как традиционными методами по известным регрессионным уравнениям (РУ) [1–4, 6, 7, 13–20], так и по математическим регрессионным моделям (РМ) в соответствии с алгоритмом (см. рис. 1) разработанной методики КРАМ [12, 21–24].

Известно [1, 2, 14–17], что величина и знак параметра дисбаланса легирования  $\Delta E$  определя-

Таблица 2. Влияние легирующих элементов базового состава промышленного сплава ЖСЗЛС на параметры его структурной стабильности

Номер состава	Содержание элементов, мас. %				Количество $\gamma'$ -фазы, об. %	Мисфит, %	Параметры структурной стабильности				
	Hf	Ta	Cr	W/Mo	$V_{\gamma'}^{20}$	$\delta$	$P_{ТПУ}$	$N_{v_{\gamma}}$	$M_{d_{\gamma}}$	$M_{d_C}$	$\Delta E$
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

ет направление реакций в  $\gamma$ -твердом растворе и склонность жаропрочных никелевых сплавов к выделению того или иного типа ТПУ-фаз. Так, в сплавах с большим отрицательным дисбалансом легирования ( $\Delta E < -0,04$ ) велика вероятность образования гетеротипных соединений: карбидов типа  $M_6C$ ,  $\alpha$ -фаз на основе ванадия и молибдена, а также топологически плотноупакованных типа  $\sigma$ ,  $\mu$ -фаз. Сплавы с большим положительным дисбалансом легирования ( $\Delta E > 0,04$ ) склонны к образованию гомеотипных соединений типа  $\eta$ -фазы на основе  $Ni_3Ti$ ,  $Ni_3Nb$ ,  $Ni_3Ta$ , а также эвтектических (перитектических) фаз на основе  $Ni_3Al$ . Если величина  $\Delta E = 0$ , то состав сплава считается идеально сбалансированным.

В табл. 2 представлены опытные варианты составов 1-5 проектируемого сплава вместе с составами промышленных сплавов ЖСЗЛС и ВЖЛ12Э среднего уровня легирования. Композиции составов, которые удовлетворяли условиям:  $P_{ТПУ} = 0,80...0,85$ ;  $N_{v_{\gamma}} \leq 2,40$  и  $M_{d_{\gamma}} \leq 0,93$ ;  $-0,04 < \Delta E < 0,04$  и  $0,972 \leq M_{d_C} \leq 0,988$ , считались фазовостабильными.

Расчеты параметров структурной стабильности, таких как  $N_{v_{\gamma}}$ ,  $M_{d_{\gamma}}$ ,  $\Delta E$ ,  $M_{d_C}$  проводили путем перевода химических составов  $\gamma$ -твердых растворов и общих составов в ат. %.

Из табл. 2 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  $\Delta E$  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  $\gamma'$ -фазы соответствует ус-

ловию ( $V_{\gamma'}^{20} = 40,6...50\%$ ), в отличие от более жаропрочного сплава ВЖЛ12Э ( $V_{\gamma'}^{20} = 60,8\%$ ), не отличающегося технологической свариваемостью. Вместе с тем сплав ЖСЗЛС не имеет требуемый уровень жаропрочности, так как количество основной упрочняющей  $\gamma'$ -фазы не соответствует условию  $43 \leq V_{\gamma'}^{20} \leq 50\%$ .

Далее в соответствии с алгоритмом методики КРАМ (см. рис. 1) для фазово-стабильных композиций 1...4 рассчитывали структурно-фазовые, физические, температурные, коррозионные и прочностные группы параметров.

При выборе оптимальной композиции проектируемого сплава для изготовления цельнолитых СА, отличающихся технологической свариваемостью, показано, что структурная стабильность является необходимым, но недостаточным 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  $\gamma'$ -фазы, которая должна находиться в контролируемых пределах ( $43 < V_{\gamma'}^{20} < 50\%$ ) по массе, а также мисфит-фактор, величина которого должна находиться в пределах ( $0,15 < \delta < 0,45\%$ ). С учетом сравнительного анализа полученных данных по группам расчетных характеристик для опытных композиций, путем многокритериальной оптимизации состава по контролируемым параметрам для дальнейших экспериментальных исследований был выбран опытный состав 3 (см. табл. 2), с присвоенным обозначением марки ЖСЗЛС-М.

Экспериментальные исследования осуществлялись на опытных образцах тестовых плавок по заданным параметрам в соответствии с табл. 2.

Оптимизированный состав спроектированного сплава ЖСЗЛС-М был следующим, мас. %: 0,10 С; 14,5 Cr; 4,5 Co; 3,0 Al; 3,0 Ti;

**Таблица 3. Параметры структурной стабильности сплава ЖСЗЛС-М [21]**

Метод расчета	Параметры структурной стабильности				
	$P_{ПЛУ} = 0,825 \pm 0,025$	$N_{\gamma} \leq 2,40$	$M_{d_{\gamma}} \leq 0,93$	$\Delta E = \pm 0,04$	$M_{d_C} = 0,980 \pm 0,008$
РУ	-	2,1945	0,9049	0,0200	0,9692
РМ	0,8323	2,2566	0,9141	0,0200	0,9840

**Таблица 4. Значения структурно-фазовых параметров сплава ЖСЗЛС-М [24]**

Тип фазы	Количество фазы, об. %		CALPHAD-метод [24]												
			Расчетный химический состав фаз при 20 °С, мас. %												
	Эксперимент	Расчет	С	Со	Cr	Al	Ti	Mo	W	Ta	Hf	Zr	B	Ni	
$\gamma$ -	49,3...48,15	48,94	-	7,95	25,3	0,38	0,06	1,4	5,67	0,14	-	-	-	59,1	
$\gamma'$ -	48,5...49,5	48,6	-	1,67	1,88	5,83	6,12	0,13	4,11	5,01	0,62	0,03	-	74,6	
МС	0,95...1,05	1,03	10,1	-	0,63	-	25,8	0,49	9,75	37,9	15,1	0,23	-	-	
$M_{23}C_6$	1,25...1,30	1,25	5,16	0,77	71,7	-	-	18,1	1,43	-	-	-	-	2,84	
$M_3B_2$	Не выявлено	0,18	-	-	20,7	-	-	69,5	1,65	-	-	-	8,15	-	

**Таблица 5. Значения физических параметров сплава ЖСЗЛС-М**

Сплав ЖСЗЛС-М	Физические параметры при 20 °С [24]									
	$\rho$	$E$	$\alpha \cdot 10^6$	$C_p$	$r \cdot 10^6$	$\lambda$	$a_{\gamma'} \cdot 10^{-4}$	$a_{\gamma} \cdot 10^{-4}$	$\delta$	
Ед. измер.	г/см <sup>3</sup>	ГПа	1/К	Дж/(г·К)	Ом·м	Вт/м·К	мкм	мкм	%	
CALPHAD	8,47	213,25	11,46	0,42	0,71	10,29	3,589	3,575	0,377	

*Примечание.*  $\rho$  – удельная плотность;  $E$  – модуль упругости Юнга;  $\alpha$  – коэффициент термического расширения;  $C_p$  – удельная теплоемкость;  $r$  – удельное электросопротивление;  $\lambda$  – теплопроводность;  $a_{\gamma'}$  – параметр кристаллической решетки  $\gamma'$ -фазы;  $a_{\gamma}$  – параметр кристаллической решетки  $\gamma$ -твердого раствора;  $\delta$  – размерное несоответствие параметров решеток (мисфит).

**Таблица 6. Температурные параметры сплава ЖСЗЛС-М [12, 22]**

Метод оценки	$\Sigma_{\gamma}$	$t_L$	$t_S$	$\Sigma_{\gamma'}$	$t_{эвт.}$	$T_{н.р.}^{\gamma'}$	$t_{н.р.}^{\gamma'}$	$\Delta t_{кр}$	$\Delta t_{гом}$	$t_{гом}$
Расчет по РМ	11,0	1370	1286	8,8	1243	845	1176	84	67	-
Эксперимент	-	1355	1290	-	1220	-	1160	65	60	1190

*Примечание.*  $\Sigma_{\gamma}$  – суммарное содержание элементов, упрочняющих  $\gamma$  – твердый раствор;  $\Sigma_{\gamma'}$  – суммарное содержание элементов, стабилизирующих  $\gamma'$ -фазу;  $t_L$  – температура ликвидус;  $t_S$  – температура солидус;  $t_{эвт.}$  – температура локального плавления эвтектической  $\gamma'$ -фазы;  $t_{н.р.}^{\gamma'}$ ,  $t_{п.р.}^{\gamma'}$  – температуры начала и полного (конца) растворения  $\gamma'$ -фазы;  $\Delta t_{кр}$  – интервал кристаллизации сплава;  $\Delta t_{гом}$  – температурный интервал для проведения гомогенизации;  $t_{гом}$  – оптимальная температура гомогенизации для сплава.

6,5 W; 2,0 Mo; 2,5 Ta; 0,3 Hf; 0,015 Zr; 0,015 B; Ni — основа.

Для сравнительной оценки склонности к структурной и фазовой нестабильности оптимизированного состава спроектированного сплава ЖСЗЛС-М использовали как традиционные расчетные методы PHASOMP ( $N_{\gamma}$ ) [7, 11], New PHASOMP ( $M_d$ ) [13],  $\Delta E$ -метод [14–17] с их известными регрессионными уравнениями (РУ), так и полученные математические регрессионные модели (РМ) [12, 21–24] (табл. 3).

На основе критериев (параметров) работоспособности литейных ЖНС, обоснованных в работах [12, 21–24], были проведены расчеты методом CALPHAD [25] по структурно-фазовым и физическим параметрам [24, 26]. В табл. 4 и 5 представлены расчетные значения структурно-фазовых и физических параметров для спроектированного сплава ЖСЗЛС-М оптимального уровня легирования.

В табл.6 представлены расчетные и экспериментальные значения, которые были получены методом дифференциального термического анализа (ДТА) на установке ВДТА-8М в среде гелия при постоянной скорости нагрева (охлаждения), равной 80 °С/мин. В качестве эталона использовался термически инертный образец чистого вольфрама (W-эталон). Технология калибровки по температурам плавления чистых металлов позволила получить хорошо воспроизводимые результаты, независимо от скорости нагрева.

Комплекс сравнительных экспериментальных исследований проводился на опытных образцах тестовых плавок из спроектированного сплава ЖСЗЛС-М в сравнении с аналогичными образцами промышленных сплавов ЖСЗЛС и ВЖЛ12Э. Опытные образцы из спроектированного сплава

Таблица 7. Характеристики коррозии сплава ЖСЗЛС-М [12, 23]

Метод оценки	$V_q^1, \text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$					$t_{\text{крит}}, \text{°C}$
	$\Pi_{\text{КС}} \geq 3,0$	$V_q^{800} \cdot 10^3$	$V_q^{850} \cdot 10^3$	$V_q^{900} \cdot 10^3$	$V_q^{950} \cdot 10^3$	
Расчет по РМ	3,81	0,0483	0,9719	3,5846	6,0234	817
Эксперимент	-	0,04	0,90	3,50	5,90	820

ва ЖСЗЛС-М получали вакуумно-индукционной плавкой на установке марки УППФ-3М по серийной технологии.

Расчетные исследования ВТК-стойкости проводили для состава спроектированного сплава ЖСЗЛС-М (табл. 4) для синтетической золы при температурах испытаний 800, 850, 900 и 950 °С на базе 100 ч по полученным математическим РМ для данной группы параметров [12, 23]. Экспериментальные исследования ВТК-стойкости образцов тестовой плавки сплава ЖСЗЛС-М проводили в синтетической золе при температурах испытаний 800, 850, 900 и 950 °С, в сравнении со сплавами ЖСЗЛС и ВЖЛ12Э по методике, разработанной Никитиным В. И. (ЦКТИ им. И. И. Ползунова), широко применяемой в отрасли [8–10]. Испытания при всех температурах проводили в течение 100 ч. Стойкость образцов опытных составов к ВТК оценивали по средней скорости коррозии  $V_q^t, \text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . В табл. 7 представлены расчетные и экспериментальные значения коррозионных параметров спроектированного сплава ЖСЗЛС-М.

Механические испытания проводили на стандартных цилиндрических образцах из разработанного сплава ЖСЗЛС-М на кратковременную и длительную прочность стандартными методами. Испытания на кратковременную прочность проводили при температурах 20, 800, 900 и 1000 °С на разрывных машинах УМЭ-10ТМ и ГСМ-20 (ГОСТ 1497-61, ГОСТ 9651-73, ГОСТ 1497-84). Испытания на длительную прочность проводили при температурах 800, 900, 975 и 1000 °С на машинах АИМА-5-2 и ZTZ 3/3 (ГОСТ 10145-81). Количество  $\gamma'$ -фазы в сплаве ЖСЗЛС-М представлено в табл. 8.

Таблица 8. Количество  $\gamma'$ -фазы в сплаве ЖСЗЛС-М, об. % [12, 24]

Метод оценки	$V_{\gamma'}^{20}$	$V_{\gamma'}^{800}$	$V_{\gamma'}^{900}$	$V_{\gamma'}^{1000}$
Расчет по РМ	48,6	47,5	44,6	33,9
Эксперимент	48,9	-	-	-

Таблица 9. Характеристики кратковременной прочности сплава ЖСЗЛС-М, МПа [12, 24]

Сплав ЖСЗЛС-М	$\sigma_B^{20}$	$\sigma_B^{800}$	$\sigma_B^{900}$	$\sigma_B^{1000}$	$\delta^{20}$	$\delta^{800}$	$\delta^{900}$	$\delta^{1000}$
Расчет по РМ	979	835	860	502	-	-	-	-
Эксперимент	930...975	811...836	849...854	500...563	8,8...13,2	3,8...5,3	2,9...5,9	5,0...11,8

Таблица 10. Предел длительной прочности (100 и 1000 ч) сплава ЖСЗЛС-М, МПа [12, 24]

Сплав ЖСЗЛС-М	$\sigma_{100}^{800}$	$\sigma_{1000}^{800}$	$\sigma_{100}^{900}$	$\sigma_{1000}^{900}$	$\sigma_{100}^{1000}$	$\Sigma_{1000}^{1000}$
Расчет по РМ	480	370	280	180	120	70
Эксперимент	480...500	350...370	280...300	170...190	110...130	70...80

В табл. 9, 10 представлены расчетные и экспериментальные значения пределов кратковременной и длительной прочности образцов тестовых плавок спроектированного сплава ЖСЗЛС-М при разных температурах.

В табл. 11 представлены сравнительные результаты расчетных и экспериментальных значений характеристик спроектированного сплава ЖСЗЛС-М по группам параметров: структурная стабильность, структурно-фазовые, физические, температурные, коррозионные и прочностные характеристики, в сравнении со значениями аналогичных характеристик промышленных сплавов ЖСЗЛС и ВЖЛ12Э.

В результате многокритериальной оптимизации состава на основе расчетных и экспериментальных исследований для заданных условий проектирования установлено, что разработанный сплав ЖСЗЛС-М обеспечивает необходимый уровень требуемых параметров и характеристик. Сбалансированный состав с указанными пределами легирования содержит оптимальное количество тантала —  $2,5 \pm 0,3$  мас. %; более низкое содержание хрома —  $14,5 \pm 0,3$  мас. %, молибдена —  $2,0 \pm 0,5$  мас. % и более высокое содержание вольфрама —  $6,5 \pm 0,3$  мас. %, чем у промышленного сплава ЖСЗЛС, взятого за прототип; более низкое содержание алюминия —  $3,3 \pm 0,3$  %, чем у сплава ВЖЛ12Э, взятого за аналог.

В условиях промышленного производства АО «Мотор Сич» по прочностным характеристикам аттестовано 5 плавов общей массой 500 кг из разработанного сплава ЖСЗЛС-М. В промышленных условиях предприятия ЗМЗ им. В. И. Омельченко по серийной технологии изготовлены опытные цельнолитые сопловые аппараты СА ТВ3-117. Отработан технологический процесс по устранению литейных дефектов методом АДС. Опытный СА ТВ3-117 поставлен на технологический двигатель, где отработал ресурс с положительным результатом и до насто-

Таблица 11. Сравнительные значения характеристик сплавов

Характеристики параметров по группам	Значения характеристик сплавов		
	Сплав-прототип ЖСЗЛС	Спроектированный сплав ЖСЗЛС-М	Сплав-аналог ВЖЛ12Э
Параметры структурной стабильности			
$\Pi_{\Gamma\Pi\Upsilon} = 0,825 \pm 0,025$	0,8290	0,8323	0,8175
$N_{v_{\gamma}} \leq 2,40$	2,2141	2,2566	2,2287
$M_{d_{\gamma}} \leq 0,93$	0,9100	0,9141	0,9114
$M_{d_c} = 0,980 \pm 0,008$	1,0061	0,9840	0,9847
$\Delta E = \pm 0,04$	0,1372	0,0200	0,0235
Структурно-фазовые параметры			
$43 \leq V_{\gamma} \leq 50 \% \text{ (об \%)}$	38,0...42,0	43,5...49,5	58,0...62,0
Физические параметры			
$\rho, \text{ г/см}^3$	8,33	8,47	7,93
мисфит $0,15 \leq \delta \leq 0,45 \%$	0,171	0,377	0,151
Температуры характеристические			
$t_L, \text{ }^\circ\text{C}$	1354	1355	1334
$t_S \leq 1280, \text{ }^\circ\text{C}$	1260	1290	1273
$\Delta t_{\text{кр}}, \text{ }^\circ\text{C}$	94	65	61
$T_{\text{эвт}}, \text{ }^\circ\text{C}$	1188	1220	1229
$T_{\text{н.п.}\gamma}, \text{ }^\circ\text{C}$	835	850	851
$T_{\text{н.п.}}, \text{ }^\circ\text{C}$	1090	1160	1222
$\Delta t_{\text{гом}}, \text{ }^\circ\text{C}$	98	60	7
$T_{\text{гом}}, \text{ }^\circ\text{C}$	1150 ± 10	1190 ± 10	без ТО
Параметры коррозионной стойкости			
$\Pi_{\text{КС}} \cdot 3,0$	4,00	3,81	2,53
$V^{800} \cdot 10^{-3}, \text{ г/(м}^2 \cdot \text{с)}$	0,04	0,05	0,16
$V^{850} \cdot 10^{-3}, \text{ г/(м}^2 \cdot \text{с)}$	0,82	0,97	2,98
$V^{900} \cdot 10^{-3}, \text{ г/(м}^2 \cdot \text{с)}$	3,07	3,58	9,97
$V^{950} \cdot 10^{-3}, \text{ г/(м}^2 \cdot \text{с)}$	5,24	5,92	15,12
$t_{\text{крит}}, \text{ }^\circ\text{C}$	825	820	770
Механические параметры			
Кратковременная прочность:			
$\sigma_B^{20} \geq 850 \text{ МПа}$	740...70	930...975	910...975
$\sigma_B^{800}, \text{ МПа}$	620...650	911...956	880...1000
$\sigma_B^{900}, \text{ МПа}$	520...600	849...854	850...870
$\sigma_B^{1000}, \text{ МПа}$	-	500...563	500...580
Длительная прочность			
$\sigma_{100}^{800}, \text{ МПа}$	380...400	480...500	480...530
$\sigma_{1000}^{800}, \text{ МПа}$	-	350...370	370...420
$\sigma_{100}^{900}, \text{ МПа}$	180...200	280...300	270...305
$\sigma_{1000}^{900}, \text{ МПа}$	-	170...90	180...205
$\sigma_{100}^{1000}, \text{ МПа}$	-	110...130	120...145
$\sigma_{1000}^{1000}, \text{ МПа}$	-	70...80	75...90
$\sigma_{180}^{975} \geq 40 \text{ ч}$	-	44...68	68...127
Устранение литейных дефектов на цельнолитых СА методом АДС	Отличается технологической свариваемостью	Отличается технологической свариваемостью	Не отличается технологической свариваемостью

ящего времени продолжает работать с целью увеличения назначенного ресурса.

**Выводы**

1. Путем многокритериальной оптимизации состава по алгоритму разработанной методики КРАМ спроектирован новый литейный свариваемый коррозионностойкий сплав ЖСЗЛС-М для изготовления цельнолитых СА разных типов, отличающийся повышенными прочностными характеристиками на уровне жаропрочного несварива-

емого и некоррозионностойкого сплава ВЖЛ12Э, а также характеризующийся коррозионной стойкостью и технологической свариваемостью на уровне промышленного литейного свариваемого коррозионностойкого никелевого сплава ЖСЗЛС.

2. Разработанный новый сплав ЖСЗЛС-М внедрен в промышленное производство АО «Мотор Сич» для изготовления цельнолитых сопловых аппаратов типа ТВ3-117 разных ступеней взамен широко применяемых промышленных сплавов ЖСЗЛС и ВЖЛ12Э.

Список литературы

1. Каблов Е. Н. (2006) Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С. Т. Кишкина: *Науч.-техн. сб.: к 100-летию со дня рождения С. Т. Кишкина*. Е. Н. Каблов (ред.). Москва, Наука.
2. Каблов Е. Н. (2007) 75 лет. Авиационные материалы. *Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007. Юбилейный научно-технический сборник*. Е. Н. Каблов (ред.) Москва, ВИАМ.
3. Шалин Р. Е., Светлов И. Л., Качанов Е. Б. и др. (1997) *Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов*. Москва, Машиностроение.
4. Кишкин С. Т., Строганов Г. Б., Логунов А. В. (1987) *Литейные жаропрочные сплавы на никелевой основе*. Москва, Машиностроение.
5. Патон Б. Е., Строганов Г. Б., Кишкин С. Т. и др. (1987) *Жаропрочность литейных никелевых сплавов и защита их от окисления*. Киев, Наукова думка.
6. Каблов Е. Н. (2001) *Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия)*. Москва, МИСИС.
7. Симс Ч. Т., Столофф Н. С., Хагель У. К. (1995) *Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок*; пер. с англ. в 2-х кн. Р. Е. Шалин (ред.). Москва, Металлургия.
8. Коваль А. Д., Беликов С. Б., Санчугов Е. Л., Андриенко А. Г. (1990) *Научные основы легирования жаропрочных никелевых сплавов, стойких против высокотемпературной коррозии (ВТК)*. Запорож. машиностр. ин-т. (Препринт).
9. Никитин В. И. (1987) *Коррозия и защита лопаток газовых турбин*. Ленинград, Машиностроение.
10. Химушин Ф. Ф. (1969) *Жаропрочные сплавы*. Москва, Металлургия.
11. Du Pont J. N., Lippold J. C., Kiser S. D. (2009) *Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys*. New Jersey, pp. 298–326.
12. Гайдук С. В. (2015) Комплексная расчетно-аналитическая методика для проектирования литейных жаропрочных никелевых сплавов. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*, **2**, 92–103.
13. Morinaga M., Yukawa N., Adachi H., Ezaki H. (1984) New PHACOMP and its application to alloy design. *Superalloys*, AIME, pp. 523–532.
14. Морозова Г. И. (2012) Компенсация дисбаланса легирования жаропрочных никелевых сплавов. *Металловедение и термическая обработка металлов*, **1** (690), 52–56.
15. Морозова Г. И. (1993) Сбалансированное легирование жаропрочных никелевых сплавов. *Металлы*, **1**, 38–41.
16. Гайдук С. В., Тихомирова Т. В. (2015) Применение аналитических методов для расчета химического состава  $\gamma$ -,  $\gamma'$ -фаз и параметров фазовой стабильности литейных жаропрочных никелевых сплавов. *Авиационно-космическая техника и технология*, **9**, 33–37.
17. Гайдук С. В., Кононов В. В., Куренкова В. В. (2015) Получение прогнозирующих математических моделей для расчета термодинамических параметров литейных жаропрочных никелевых сплавов. *Современная электрометаллургия*, **4**, 31–37.
18. Гайдук С. В., Кононов В. В., Куренкова В. В. (2016) Регрессионные модели для прогнозирующих расчетов коррозионных параметров литейных жаропрочных никелевых сплавов. *Там же*, **3**, 51–56.
19. Гайдук С. В., Тихомирова Т. В. (2015) Применение CALPHAD-метода для расчета количества  $\gamma'$ -фазы и прогнозирования длительной прочности литейных жаропрочных никелевых сплавов. *Металлургическая и горно-рудная промышленность*, **6**, 64–68.
20. Saunders N., Fahrman M., Small C. J. (2000) The Application of CALPHAD Calculations to Ni-Based Superalloys. *Superalloys 2000*. pp. 803–811.
21. Гайдук С. В., Кононов В. В., Куренкова В. В. (2015) Расчет фазового состава литейного жаропрочного коррозионно-стойкого никелевого сплава методом CALPHAD. *Современная электрометаллургия*, **3**, 35–40.
22. Вертоградский В. А., Рыкова Т. П. (1984) *Исследование фазовых превращений в сплавах типа ЖС методом ДТА. Жаропрочные и жаростойкие стали и сплавы на никелевой основе*. Москва, Наука, сс. 223–227.
23. Гайдук С. В., Баликов С. Б., Кононов В. В. (2004) О влиянии тантала на характеристические точки жаропрочных никелевых сплавов. *Вестник двигателестроения*, **3**, 99–102.
24. Гайдук С. В., Петрик И. А., Кононов В. В. (2015) Сравнительные исследования свариваемости литейных жаропрочных никелевых сплавов. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*, **1**, 82–88.

References

1. Kablov, E.N. (2006) Cast high-temperature alloys. S.T. Kishkin effect. In: *Transact. to 100th Anniversary of S.T. Kishkin*. Ed. by Kablov. Moscow, Nauka [in Russian].
2. Kablov, E.N. (2007) 75 years. Aviation materials. *Selected works of VIAM: Jubilee Scient.-Techn. Transact.* Ed. by E.N. Kablov. Moscow, VIAM [in Russian].
3. Shalin, R.E., Svetlov, I.L., Kachanov, E.B. et al. (1997) *Single crystals of nickel high-temperature alloys*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
4. Kishkin, S.T., Stroganov, G.B., Logunov, A.V. (1987) *Cast high-temperature nickel-base alloys*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
5. Paton, B.E., Stroganov, G.B., Kishkin, S.T. et al. (1987) *High-temperature strength of cast nickel alloys and their protection from oxidation*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
6. Kablov, E.N. (2001) *Cast blades of gas-turbine engines (alloys, technology, coatings): State Scientific Center of Russian Federation*. Moscow, MISIS [in Russian].
7. Sims, Ch.T., Stoloff, N.S., Hagel, U.K. (1995) *Superalloys II: High-temperature materials for aerospace and industrial power units*. Ed. by R.E. Shalin. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
8. Koval, A.D., Belikov, S.B., Sanchugov, E.L., Andrienko, A.G. (1990) *Scientific basics of alloying of high-temperature nickel alloys resistant to high-temperature corrosion (HTC)*. Zaporozhye Machine Building Institute [in Russian].
9. Nikitin, V.I. (1987) *Corrosion and protection of gas turbine blades*. Leningrad, Mashinostroenie [in Russian].
10. Khimushin, F.F. (1969) *High-temperature alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
11. Du Pont, J.N., Lippold, J.C., Kiser, S.D. (2009) *Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys*. New Jersey, 298–326.
12. Gajduk, S.V. (2015) Complex calculated-analytical procedure for design of cast high-temperature nickel-base alloys. *Novi Materialy i Tekhnologii v Metalurgii ta Mashynobuduvanni*, **2**, 92–103 [in Russian].
13. Morinaga, M., Yukawa, N., Adachi, H., Ezaki, H. (1984) New PHACOMP and its application to alloy design. *Superalloys*, AIME, 523–532.
14. Morozova, G.I. (2012) Compensation of disbalance of alloying of high-temperature nickel alloys. *Metallovedenie i Termich. Obrab. Metallov*, **12**, 52–56 [in Russian].
15. Morozova, G.I. (1993) Balanced alloying of high-temperature nickel alloys. *Metally*, **1**, 38–41 [in Russian].
16. Gajduk, S.V., Tikhomirova, T.V. (2015) Application of analytical methods for calculation of chemical composition of  $\gamma$ -,  $\gamma'$ - phases and parameters of phase stability of cast high-temperature nickel-base alloys. *Aviats.-Kosmich. Tekhnika i Tekhnologiya*, **9**(126), 33–37 [in Russian].
17. Gajduk, S.V., Kononov, V.V., Kurenkova, V.V. (2015) Construction of predictive mathematical models for calculation of thermodynamical parameters of cast high-temperature nickel alloys. *Sovrem. Elektrometall.*, **4**, 31–37 [in Russian].
18. Gajduk, S.V., Kononov, V.V., Kurenkova, V.V. (2016) Regression models for predictive calculations of corrosion parameters of cast high-temperature nickel alloys, *Ibid.*, **3**, 51–56 [in Russian].
19. Gajduk, S.V., Tikhomirova, T.V. (2015) Application of CALPHAD- method for calculation of  $\gamma'$ -phase and



- prediction of long-term strength of cast high-temperature nickel alloys, *Metallurg. i Gornorudnaya Promyshlennost*, **6**, 64-68 [in Russian].
20. Saunders, N., Fahrman, M., Small, C.J. (2000) The application of CALPHAD calculations to Ni-based superalloys. In: *Superalloys 2000*. TMS, Warrendale, 803-811.
  21. Gajduk, S.V., Kononov, V.V., Kurenkova, V.V. (2015) Calculation of phase composition of cast high-temperature corrosion-resistant nickel alloy by CALPHAD method. *Sovrem. Elektrometall.*, **3**, 35-40 [in Russian].
  22. Vertogradsky, V.A., Rykova, T.P. (1984) *Investigation of phase transformations in alloys of high-temperature type by DTA method*. In: High-temperature and heat-resistant nickel-base steels and alloys. Moscow, Nauka, 223-227.
  23. Gajduk, S.V., Belikov, S.B., Kononov, V.V. (2004) About influence of tantalum on characteristic points of high-temperature nickel alloys. *Vestnik Dvigatelostroneniya*, **3**, 99-102.
  24. Gajduk, S.V., Petrik, I.A., Kononov, V.V. (2015) Comparative investigations of weldability of cast high-temperature nickel alloys. *Novi Materialy i Tekhnologii v Metalurgii ta Mashynobuduvanni*, **1**, 82-88 [in Russian].

С. В. Гайдук<sup>1</sup>, В. В. Кононов<sup>1</sup>, В. В. Куренкова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Запорізький нац. технічний університет (ЗНТУ).  
69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64.

E-mail: rector@zntu.edu.ua

<sup>2</sup>ООО «Патон Турбайн Текнолоджіз».  
036028, м. Київ, вул. Ракетна, 26.

E-mail: VKurenkova@patontt.com

АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЕКТУВАННЯ СКЛАДУ  
ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЖАРОМІЦНОГО СПЛАВУ  
НА НІКЕЛЕВІЙ ОСНОВІ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ  
ЦІЛЬНОЛИТИХ СОПЛОВИХ АПАРАТІВ

За алгоритмом розробленої комплексної розрахунково-аналітичної методики спроектований новий ливарний жароміцний корозійностійкий нікелевий сплав ЖСЗЛС-М для виготовлення цільнолитих соплових апаратів, що має жароміцність

$\sigma_{40}^{975} = 180...200$  МПа на рівні промислового жароміцного некорозійностійкого сплаву ВЖЛ12Е, а також технологічну зварюваність і корозійну стійкість на рівні промислового зварюваного корозійностійкого сплаву ЖСЗЛС. Бібліогр. 24, табл. 11, рис. 1.

*Ключові слова:* ливарні жароміцні нікелеві сплави, параметри працездатності; комплексна розрахунково-аналітична методика, регресійна модель, регресійне рівняння, службові властивості; зварюваність

S. V. Gajduk<sup>1</sup>, V. V. Kononov<sup>1</sup>, V. V. Kurenkova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Zaporozhye National Technical University.  
64 Zhukovsky Str., 69063, Zaporozhye.

E-mail: rector@zntu.edu.ua

<sup>2</sup>LCC «Paton Turbine Technologies».  
26 Raketnaya Str. 630028, Kyiv.

E-mail: VKurenkova@patontt.com

AUTOMATED DESIGNING OF HEAT-RESISTANT ALLOY  
COMPOSITION ON NICKEL BASE FOR MANUFACTURE  
OF ALL-CAST NOZZLE APPLIANCES

According to the algorithm of a comprehensive analytical solution method (CASM), a new high-temperature corrosion-resistant nickel-base cast alloy ZMI-ZU-M1 has been developed for manufacture of turbine blades by the method of a directional (mono-) crystallization. The developed alloy is characterized by the corrosion resistance at the level of the industrial corrosion-resistant alloy ZMI-ZU, having the improved high-temperature properties ( $\sigma_{40}^{975} = 260$  МПа) at the level of the aircraft high-temperature nickel-base cast alloy ZhS26 VI with the directed crystallization. 27 Ref., 11 Tabl., 2 Fig.

*Keywords:* high-temperature nickel-base cast alloys; performance parameters; CASM-technique; regression model; regression equation; service properties; weldability

Поступила в редакцію 22.11.2017

**Возможности**

**ГОРИЗОНТ 2020: ГРАНТОВАЯ ПРОГРАММА ЕС  
ПО ИССЛЕДОВАНИЯМ И ИННОВАЦИЯМ**

Программа оказывает поддержку широкому спектру деятельности: от научных исследований до демонстрационных проектов и инноваций, готовых к выходу на рынок.

По ссылке можно найти календарь основных открытых конкурсов на 2018-2019 гг.:



[http://www.zabala.co.uk/sites/default/files/documentos/publicaciones/zabala17\\_h2020\\_deadlines\\_2018-2019.pdf](http://www.zabala.co.uk/sites/default/files/documentos/publicaciones/zabala17_h2020_deadlines_2018-2019.pdf)