

# МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА НОВЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

ОАО "НПО "САТУРН":  
**Александр Вячеславович Логунов**, главный специалист по материалам и технологиям, д.т.н., профессор  
**Юрий Николаевич Шмотин**, генеральный конструктор, к.т.н.  
**Игорь Алексеевич Лещенко**, ведущий инженер-конструктор, д.т.н., доцент  
**Роман Юрьевич Старков**, главный конструктор, к.т.н.

*Созданы новые литейные никелевые жаропрочные сплавы с монокристалльной структурой, имеющие наиболее высокие показатели жаропрочности, но при этом благодаря экономному легированию весьма дорогим рением и элементом платиновой группы рутением отличающиеся существенно более низкой (от 1,5...2 до 10 раз) стоимостью требуемых шихтовых материалов.*

*New cast nickel heat-resistant single-crystal alloys were created. They provide ultimate heat-resistance indices, being outstanding according to considerably lower (1.5...10 times) price of blend due to economical doping with extremely expensive rhenium and platinum group element ruthenium.*

**Ключевые слова:** жаропрочность, суперсплав, безрутениевый, экономнолегированный, оптимизация, технология.  
**Keywords:** heat-resistance, superalloy, without ruthenium, economically doped, optimization, technology.

## Часть 2. Разработка новых сплавов

В части 1 настоящей работы была представлена технология определения оптимальных составов сплавов. Разработанная технология отличается двумя принципиальными особенностями:

1. Высокой точностью построения моделей, связывающих состав и свойства сплавов, получаемых с использованием дополнительных критериев предсказательной погрешности.

2. Автоматизированной процедурой поиска оптимальных составов по заданным требованиям.

Созданный компьютерный метод не имеет аналогов и был успешно использован при создании литейных жаропрочных никелевых сплавов с монокристалльной структурой для рабочих и сопловых лопаток ПТД - СЛЖС-1 [7] и СЛЖС-3 [8].

Принципиальное отличие этих материалов заключается в том, что они, имея наиболее высокий (каждый в своем классе) уровень жаропрочности, не содержат в своем составе элемент платиновой группы рутений. А сплав СЛЖС-1, кроме этого, не имеет в своем составе такой остродефицитный и отличающийся крайне высокой стоимостью металл, как рений.

Значения важнейших критериев, определяющих работоспособность сплава СЛЖС-1, приведены в таблице 3.

В этой таблице представлены параметры, характеризующие сплавы, а именно объемная доля  $\gamma'$ -фазы (количество  $\gamma'$ ), величина "мисфита", уровень  $M(\bar{d})$ , значение длительной прочности и т.д.

При этом, как уже отмечалось, в составе сплава отсутствуют дорогостоящие рений и рутений. Поэтому цена шихты нового сплава равна ~125 \$/кг, в то время как стоимость шихты сплава ЖС32У, имеющего тот же уровень жаропрочности, составляет величину порядка 800 \$/кг.

### Создание экономнолегированного безрутениевого сплава СЛЖС-3

Целью настоящей работы являлось создание нового ЖС, получившего название СЛЖС-3, с длительной прочностью при температуре 1000 °C  $\sigma_{1000}^{1000} = 320...340$  МПа, экономнолегированного рением, при этом в его составе отсутствует рутений. Выполненное с помощью разработанной программы исследование показало, что обеспечение уровня жаропрочности  $\sigma_{1000}^{1000}$  порядка 330 МПа возможно. При этом в сплаве не будут образовываться пластинчатые ТПУ-фазы, а также другие выделения, оказывающие отрицательное влияние на жаропрочность.

В составе сплава отсутствует элемент платиновой группы рутений, что заметно снижает его стоимость. Кроме этого с целью дополнительного уменьшения стоимости сплава без ухудшения его рабочих характеристик в сплаве снижено содержание рения (среднее значение концентрации этого элемента уменьшилось по сравнению с серийными аналогами и составляет ~5 %).

Для обеспечения высокого уровня жаропрочности общий интервал легирования сплава вольфрамом увеличен.

Выполненные аналитические исследования и расчеты суммарной концентрации электронных вакансий элементов, входящих в образующуюся  $\gamma$ -фазу, показали, что скорректированный состав сплава допускает повышенное суммарное содержание влияющих непосредственно на уровень жаропрочности элементов - вольфрама, тантала и рения без образования охрупчивающих ТПУ-фаз, однако при этом допустимые интервалы суммарной концентрации этих элементов, а также (хрома + кобальта), влияющих на механизм образования охрупчивающих фаз  $\sigma$ -,  $\mu$ - и др., становятся существенно более узкими и должны находиться внутри определенных значений. Именно это обстоятельство явилось причиной введения в условия производства сплава следующих условий:  $25,3 < (W + Re + Ta) < 27,0$  и  $8,7 < (Cr + Co) < 10,1$ , где концентрации указанных элементов приведены в мас. %.

В таблице 4 представлены сравнительные данные перспективных никелевых суперсплавов с монокристалльной структурой для охлаждаемых лопаток ПТД 2-го - 5-го поколений.

Таблица 3

Результаты компьютерного расчета параметров жаропрочного никелевого сплава СЛЖС-1	
Количество $\gamma'$ , %	67,96
Мисфит, % · 100	0,0501
$M(\bar{d})$	0,9053
Сумма $W+Al+Ta+Re+Mo+Nb+Hf$	21,67203
$\sigma_{1000}^{1000}$	265,7
$T_{ГР}$ , °C	1300
$d$ , г/см <sup>3</sup>	9,07

Видно, что сплав имеет положительный мисфит, в нем содержится около 68 %  $\gamma'$ -фазы, величина  $M(\bar{d})$  значительно ниже теоретической (0,93) и равна 0,905. Сплав обладает длительной прочностью  $\sigma_{1000}^{1000}$ , равной ~266 МПа, что ставит его на один уровень со сплавами СМСХ-4 ( $\sigma_{1000}^{1000} = 255$  МПа), используемым в двигателе 5-го поколения истребителя F-22, а также ЖС32У (ВЖМЗ), длительная прочность которого равна 265 МПа.

Анализ результатов, приведенных в данной таблице, показывает, что сплав СЛЖС-3 обладает наиболее высокой жаропрочностью при 1000 °С и испытаниях длительностью 100 и 300 ч.

По параметру удельной длительной прочности ( $\sigma_{300}^{1000}/d$ , см · 10<sup>-1</sup>) этот сплав значительно лучше всех мировых аналогов, хотя стоимость его шихты в 1,4...2,0 раза ниже, чем у материалов-конкурентов.

Аналогичный уровень удельной длительной прочности имеет лишь последний сплав Японии TMS-196 [12], однако цена его легирующих элементов является самой высокой из всех представленных в настоящей работе сплавов и вдвое превышает стоимость шихты сплава СЛЖС-3.

Проблема повышения температурной работоспособности никелевых жаропрочных монокристаллических сплавов требует обсуждения вопроса увеличения удельного веса новых материалов.

Дело в том, что прочность сплава при высоких температурах обеспечивают легирующие элементы, имеющие наиболее высокую температуру плавления и наименьшую диффузионную подвижность, контролирующую процессы структурных изменений в материале (особенности диффузионного массопереноса при высоких температурах достаточно подробно обсуждались в [9, 10]). К этим элементам в первую очередь относятся W, Ta и Re, которые имеют весьма высокий удельный вес и легирование которыми приводит (наряду с заметным увеличением жаропрочности сплавов) к росту их плотности.

Таким образом, увеличение жаропрочности никелевых сплавов связано с ростом их удельного веса. Анализ данных по никелевым монокристаллическим сплавам от 1-го до 4-го поколений [11], показывает, что среднее значение удельного веса сплавов 1-го поколения составило 8,45 г/см<sup>3</sup>, для 2-го поколения 8,8г/см<sup>3</sup>, для 3-го поколения 9,0 г/см<sup>3</sup>, и для 4-го поколения - 9,03 г/см<sup>3</sup>.

Однако при этом их удельная жаропрочность растет гораздо более высокими темпами, обеспечивая успешную эксплуатацию новых сплавов в газотурбинных двигателях. В частности, удельная жаропрочность (при длительности испытаний 300 ч) монокристаллических сплавов 1-го поколения CMSX-2 и ЖС-40 ( $\sigma_{300}^{1000}/d$ , см · 10<sup>-3</sup>) составила 20,9 и 22,6 соответственно, в то время как этот же показатель для монокристаллических сплавов 4-го поколения составляет величину 30...32 (таблица 4). Т.е. за 30 лет был совершен скачек примерно в 1,5 раза, что является весьма высоким показателем роста жаропрочности никелевых сплавов за все время их эксплуатации в ГТД.

Сплавы СЛЖС-3 и СЛЖС-1 имеют достаточно высокие значения удельного веса - 9,35 и 9,07 соответственно. Однако при этом они обеспечивают наибольшие (для своего класса) параметры удельной длительной жаропрочности.

Напомним, что в свое время сплав ЖС-32 также имел наи-

большой удельный вес среди сплавов-аналогов (8,8 г/см<sup>3</sup>)\*, отличаясь существенно более высокими показателями жаропрочности и удельной длительной прочности. Именно это обстоятельство побудило генеральных конструкторов А.М. Льюлку, С.П. Изотова и других применять его в своих новых двигателях, и этот сплав спустя более чем 25 лет, является одним из наиболее надежных и востребованных промышленностью.

Сплав СЛЖС-3 обладает высокой структурной стабильностью - температура полного растворения  $\gamma'$ -фазы в нем составляет ~1340 °С, а доля упрочняющей  $\gamma'$ -фазы находится на уровне 66 % по массе.

На рис. 8 представлена микроструктура сплава СЛЖС-3 (x30), типичная для монокристаллического строения материала в виде "малтийского креста".

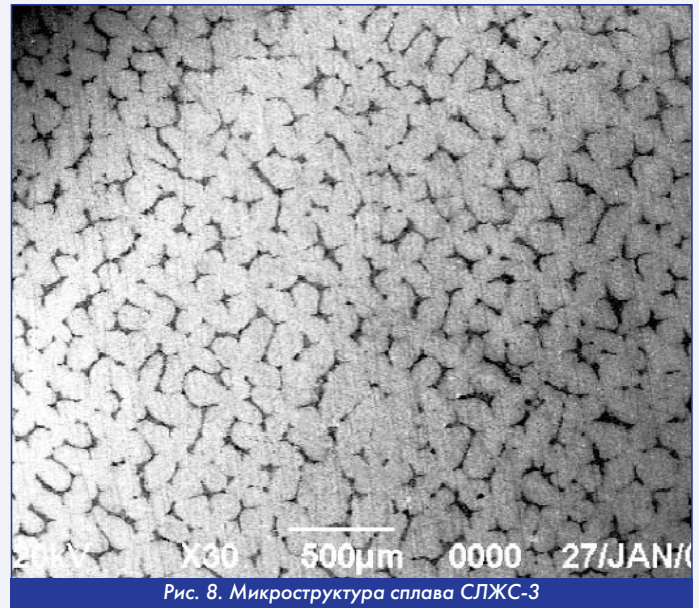


Рис. 8. Микроструктура сплава СЛЖС-3

Микроструктура этого же сплава при увеличении (x10 000) после закалки показана на рис. 9,а и после "закалки + старения" - на рис. 9,б. Видно, что после закалки средний размер precipитов  $\gamma'$ -фазы кубической формы составляет 0,25 мкм, а после старения равномерность распределения выделений упрочняющей  $\gamma'$ -фазы кубической формы сохраняется, но при этом ее средний размер увеличивается до 0,5 мкм. ТПУ- и  $\alpha$ -фаз в микроструктуре сплава не обнаружено.

\*- В то время успешно эксплуатировался и сплав ЖС-16 с удельным весом ~9,0 г/см<sup>3</sup>, однако он применялся для изготовления сопловых лопаток ГТД.

Перспективные никелевые суперсплавы с монокристаллической структурой для охлаждаемых лопаток ГТД (2 - 5 поколений) [11, 12]

Сплав, страна	Особенности легирования	Свойства при 20 °С			Свойства при 1000 °С		Стоимость шихты, \$/кг	Удельная длительная прочность $\sigma_{300}^{1000}/d$ , см · 10 <sup>-3</sup>	d, г/см <sup>3</sup>
		$\delta_v$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_{100}$ , МПа	$\sigma_{1000}$ , МПа			
<b>3-е - 5-е поколения</b>									
СЛЖС-3, Россия	4,8 % Re, без Ru	1170	980	8,0	347	300 ( $\tau = 300$ ч)	483,6	31,8	9,35
TMS-196, Япония	6,4 % Re, 5 % Ru	-	-	-	320	235	953,6	31,4	9,01
TMS-162, Япония	5 % Re, 6 % Ru	-	-	-	320	230	881,8	31,0	9,1
ERM-102, США	6 % Re, 3 % Ru	-	-	-	325	200	788,7	28,9	9,2
ВЖМ-1, Россия	9 % Re	1190	945	21	330	215	862,4	31,2	9,1
ВЖМ-4, Россия	6,5 % Re, 4 % Ru	1220	865	20	315	200	848,4	28,7	8,9
ВЖМ-6, Россия	Re + Ru = 11 %	-	-	-	-	220	913,7	30,7	9,04
MC-NG, Франция	4 % Re, 4 % Ru	-	-	-	275	190	662,6	26,8	8,75
CMSX-10 (RR3000), США, Великобритания	6 % Re	1190	985	21	290	185	584,2	27,2	9,05
<b>2-е поколения</b>									
СЛЖС-1, Россия	Без Re, без Ru	-	-	-	265	-	123,0	24,7	9,07
CMSX-4, США	3 % Re	-	-	-	255	-	360,0	24,8	8,73
ЖС-32, Россия	4 % Re	-	-	-	245	-	452,0	22,7	8,8

Таблица 4

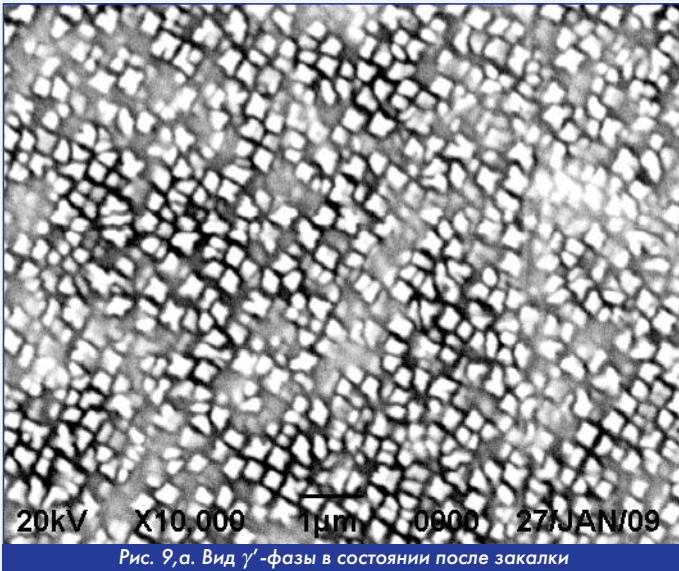


Рис. 9,а. Вид  $\gamma$ -фазы в состоянии после закалки

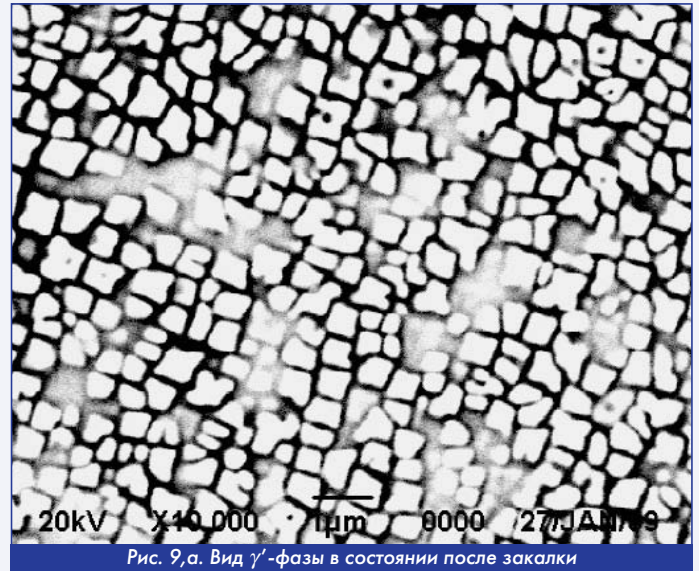


Рис. 9,а. Вид  $\gamma$ -фазы в состоянии после закалки

Из сплава СЛЖС-3 отлиты опытные экземпляры рабочих охлаждаемых лопаток, которые в настоящее время готовятся к испытаниям.

**Литература**

7. А.В. Логунов, М.Л. Кузменко, Ю.Н. Шмотин, С.А. Гришихин "Жаропрочный литейный сплав на основе никеля", Патент РФ № 499185, 2012.

8. А.В. Логунов, М.Л. Кузменко, Ю.Н. Шмотин, С.А. Гришихин "Литейный никелевый жаропрочный сплав", Патент РФ № 2446221, 2012.

9. Б.Е. Патон, С.Т. Кишкин, С.З. Бокштейн, А.В. Логунов и др. "Жаропрочность литейных никелевых сплавов и защита их от

окисления", Киев, Наукова думка, 1987. - 256 с.

10. С.З. Бокштейн Диффузия и структура металлов. - М.: Металлургия, 1973. - 1-208 с.

11. Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина, Сборник статей. М., "Наука", 2006, 232 с.

12. Akihiro SATO, Hiroshi HARADA, An-Chou YEH, Kyoko KAWAGISHI, Toshiharu KOBAYASHI, Yutaka KOIZUMI, Tadaharu YOKOKAWA, and J-X.ZHANG. "A 5th Generation SC Superalloy With Balanced High Temperature Properties and Processability". Super-alloys 2008, Pennsylvania USA, a publication of TMS, p.p. 131-138.

Связь с автором: 8-495-683-99-31

# ХІІ МЕЖДУНАРОДНЫЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ – 2013

МЕЖДУНАРОДНЫЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ВЫСТАВКИ И КОНФЕРЕНЦИИ

# 19 - 22 НОЯБРЯ



Генеральные информационные партнеры:



Технический партнер:



**ОРГАНИЗАТОР**  
**Международный выставочный центр**  
**ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:**  
**Государственного агентства Украины по управлению государственными корпоративными правами и имуществом Украинской Национальной Компании "Укрстанкоинструмент"**



**Международный выставочный центр**  
 Украина, 02660, Киев  
 Броварской пр-т, 15  
 М "Левобережная"  
 ☎ (044) 201-11-65, 201-11-56  
 e-mail: [lilia@iec-expo.com.ua](mailto:lilia@iec-expo.com.ua)  
[www.iec-expo.com.ua](http://www.iec-expo.com.ua)  
[www.tech-expo.com.ua](http://www.tech-expo.com.ua)