Разработка безрениевого высокожаропрочного никелевого сплава для монокристаллических лопаток турбин, освоение его производства и изготовления деталей из него

ПАО «ОДК-Сатурн»
Д.т.н. Логунов А.В., д.т.н. Лещенко И.А., к.т.н. Данилов Д.В., к.т.н. Хрящев И.И., Заводов С.А., к.т.н. Ильин И.В.

Уровень температурной работоспособности никелевых жаропрочных сплавов в основном определяется содержанием в них тугоплавких элементов, таких как вольфрам, молибден, ниобий, тантал, рений и рутений. В зависимости от химического состава монокристаллические сплавы для лопаток турбин принято разделять на поколения. Первое поколение не содержит в своем составе рений и рутений. Второе поколение легировано рением до 5%. В третьем поколении жаропрочных сплавов содержание этого элемента превысило отметку 5 % и может достигать 9%. Начиная с четвертого поколения в качестве легирующих элементов одновременно стали применяться и рений и рутений.

Рений – крайне дефицитный элемент, в России отсутствуют его освоенные месторождения, а по стоимости он сопоставим с золотом. Рутений еще более дорогой элемент, относящийся к платиновой подгруппе.

Тем не менее, несмотря на выдающиеся характеристики жаропрочности (Рис. 1), сплавы, легированные рутением, не нашли широкого применения из-за их чрезмерно высокой стоимости (Рис. 2).

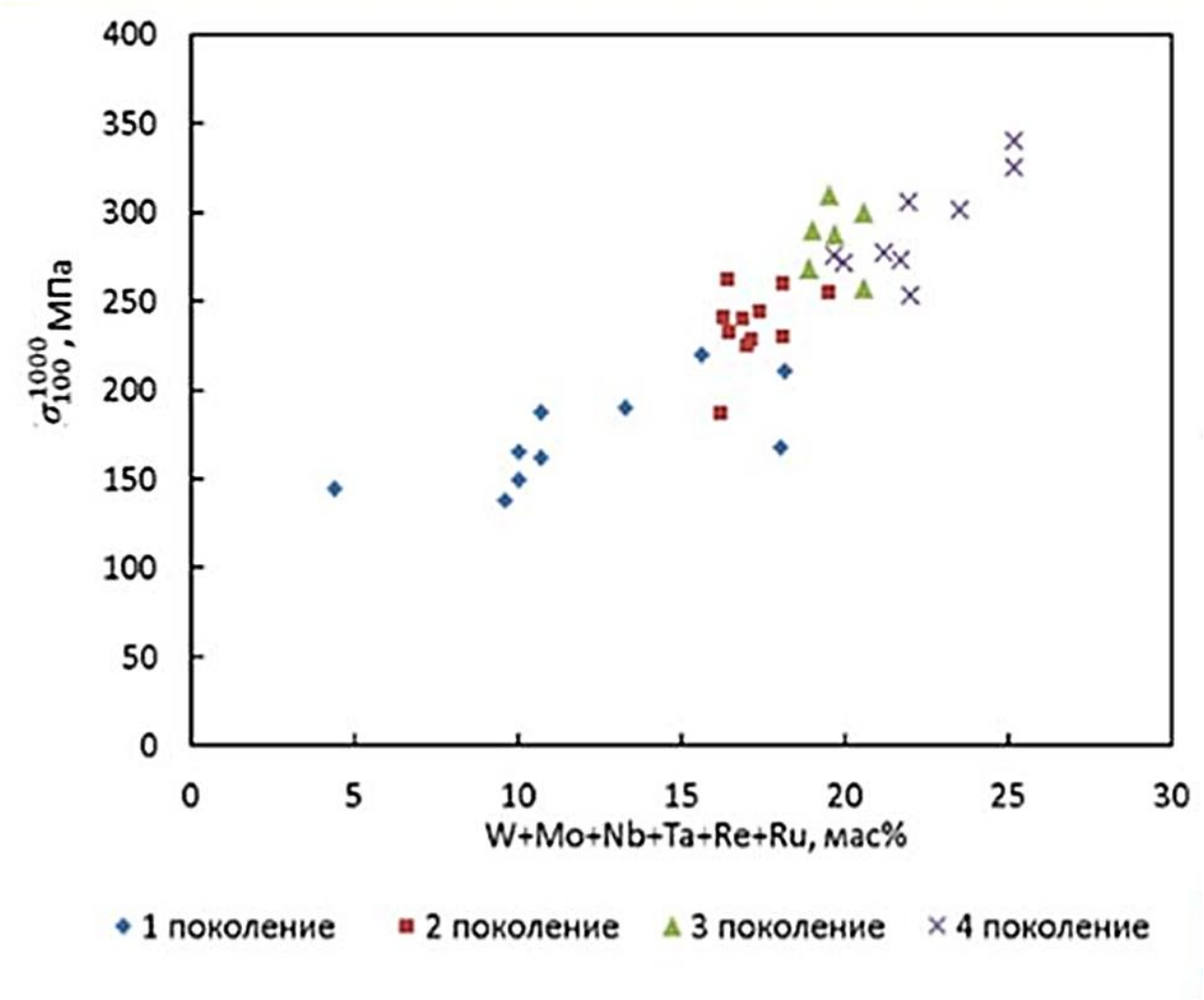

Рис. 1 – Зависимость жаропрочности от содержания тугоплавких элементов

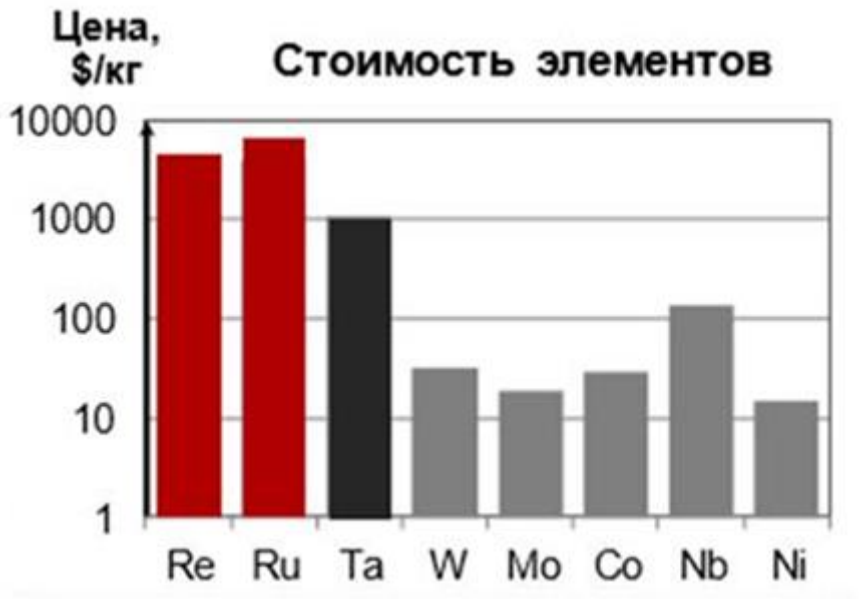

Рис. 2 – Стоимость некоторых компонентов никелевых жаропрочных никелевых сплавов.

Первым отечественным жаропрочным монокристаллическим сплавом, легированным рением, является ЖС32. Несмотря на то, что уже создано достаточно большое количество более жаропрочных сплавов, благодаря своим характеристикам, ЖС32 по-прежнему остается наиболее востребованным высокожаропрочным монокристаллическим сплавом и используется почти во всех отечественных двигателях.

В ЖС32 содержится 4% рения, что составляет основу стоимости сплава.

Также ЖС32, являясь первым отечественным жаропрочным сплавом, легированным рением, отличается недостаточным уровнем стабильности. При высоких температурах в процессе эксплуатации рений взаимодействует с хромом и образует охрупчивающие топологически-плотноупакованные фазы (ТПУ-фазы). Это пластинчатые интерметаллидные соединения, скопления которых образуют сетчатую структуру и фактически представляют собой готовые трещины, что приводит к преждевременному разупрочнению сплава.

В ПАО «ОДК-Сатурн» для замены ЖС32 был разработан и запатентован (Пат. RU 2 626 118 C2) новый монокристаллический жаропрочный сплав СЛЖС32, обладающий аналогичным уровнем характеристик, но без использования рения. Отказ от рения позволил снизить стоимость компонентов, из которых состоит сплав, в 3,5 раза по сравнению с ЖС32.

Была отработана технология промышленного производства сплава, выплавлена опытно-промышленная партия массой 500 кг. Отработаны режимы получения монокристаллических отливок и их термической обработки. Отработана технология получения монокристаллических лопаток турбины высокого давления из нового сплава, изготовлен опытный комплект лопаток. Лопатки успешно прошли испытания на стенде для определения предела выносливости.

Характеристики жаропрочности нового сплава представлены на рисунках 3, 4 и в таблице 1.

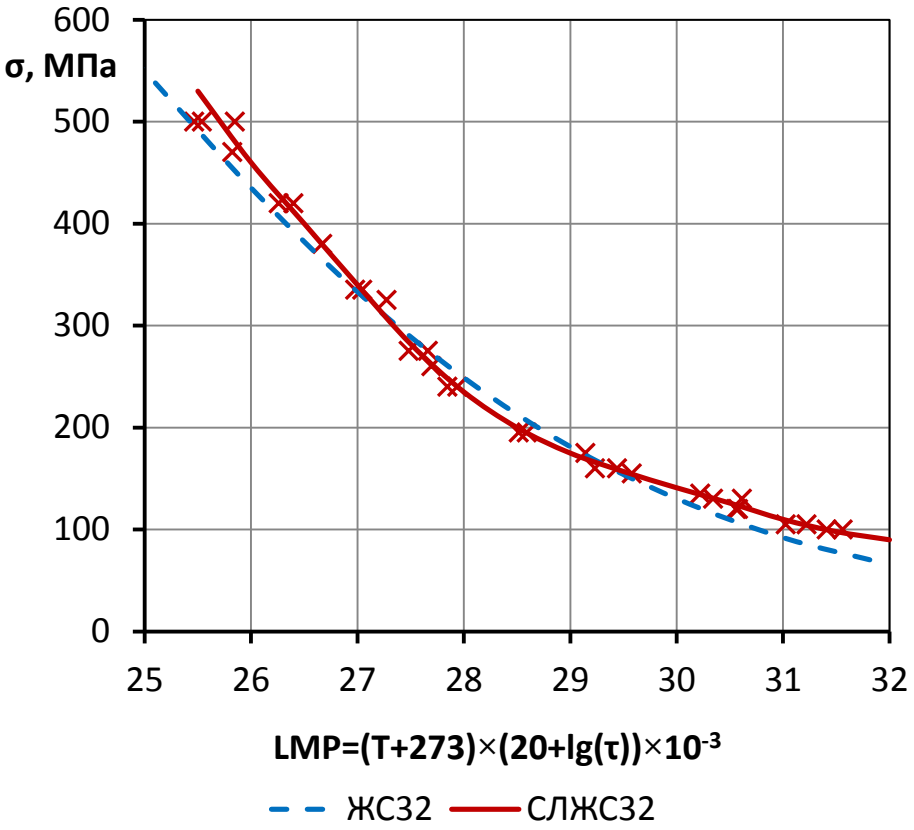

Рис. 3 – Кривые Ларсона-Миллера сплавов СЛЖС32 и ЖС32

Таблица 1 – Характеристики длительной прочности ЖС32 и СЛЖС32

	ЖС32			СЛЖС32		
t, час / T , ºC	100	500	1000	100	500	1000
900	460	371	336	490	383	343
950	343	266	237	352	257	225
1000	245	186	165	235	180	165
1050	174	129	114	171	140	129
1100	122	90	77	135	106	97
1150	85	55	40	106	н.д.	н.д.

Благодаря применению математического моделирования и программных средств оптимизации в сплаве СЛЖС32 удалось добиться высокой структурно-фазовой стабильности и исключить вероятность образования негативных фаз как на этапе производства деталей, так и в процессе эксплуатации. Это обеспечило значительное преимущество сплава СЛЖС32 перед ЖС32 при температурах 1050 и более. В частности (рис. 4):

- при нагрузке 100МПа и температуре 1100ºС ресурс сплава СЛЖС32 превышает ресурс ЖС32 в 3 раза (750ч против 250ч);
- при нагрузке 130МПа и температуре 1100ºС ресурс сплава СЛЖС32 превышает ресурс ЖС32 в 2 раза (135ч против 68ч).

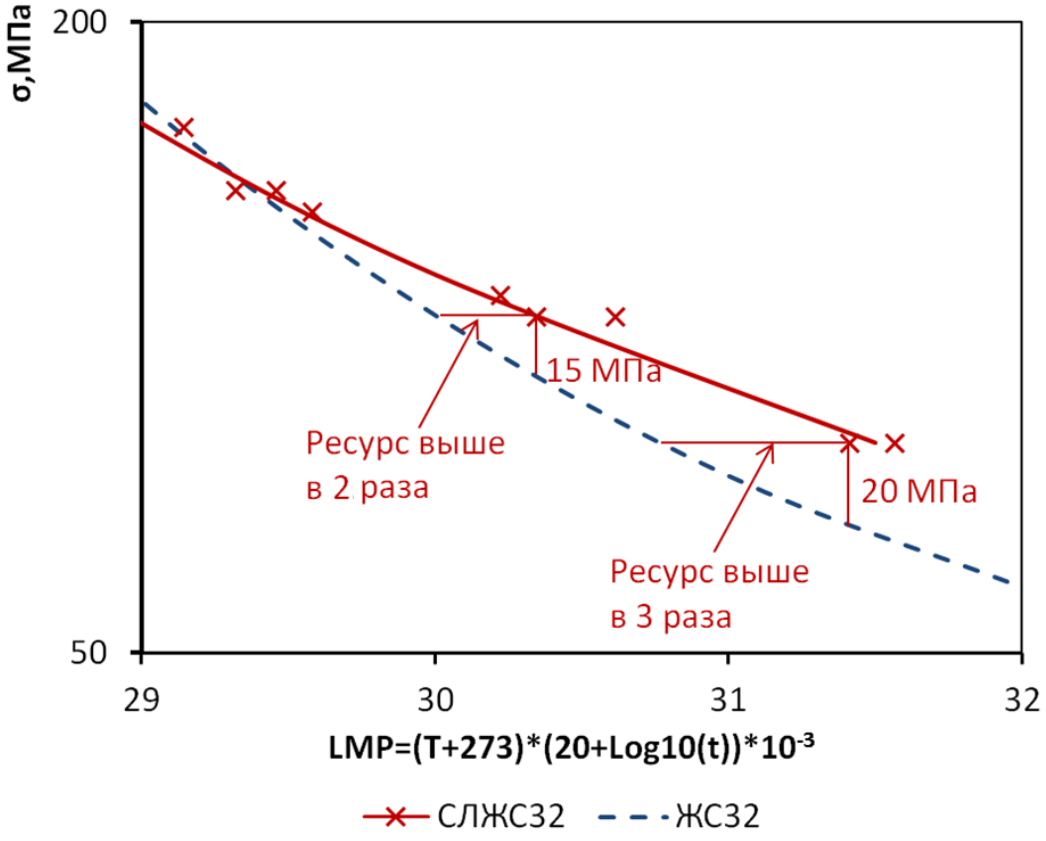

Рис. 4 – Сравнение характеристик жаропрочности сплавов СЛЖС32 и ЖС32 при температуре 1100°С

Аналогичный ресурс сплав ЖС32 обеспечивает при нагрузках 80МПа и 115МПа соответственно, то есть преимущество СЛЖС32 перед ЖС32

составляет до 25% по нагрузке. При этом рабочая температура СЛЖС32 возросла до 1150°С.

Заключение

Разработан и запатентован новый сплав СЛЖС32, находящийся в самом востребованном сегменте высокожаропрочных монокристаллических никелевых сплавов. Значительное снижение стоимости сплава (в 3,5 раза по стоимости составных компонентов по сравнению с ЖС32) обеспечит повышение конкурентоспособности как существующих образцов двигателей, путем замены ЖС32 на СЛЖС32 при модернизации, так и вновь разрабатываемых.

Характеристики СЛЖС32 позволяют не только полностью заменить сплав ЖС32, но и обеспечивают возможность его применения в более широком интервале температур за счет увеличения высокотемпературной работоспособности (предельная рабочая температура возросла на 100°С, значительно увеличена жаропрочность при температурах более 1050°С) .

Полностью освоена вся технологическая цепочка от промышленного производства сплава до изготовления монокристаллических лопаток турбин высокого давления. Сплав подготовлен к паспортизации.