

УДК 55.09.33

А.А. ЖУКОВ, О.А. СМИРНОВА

*Рыбинская государственная авиационная технологическая академия  
им. П.А. Соловьева, Россия***ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ПРИГОДНОСТИ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ  
ДЛЯ ГТД И ГТУ**

Предложены обобщенные характеристики химического состава: алюминиевый и хромовый эквиваленты; выявлены структурные превращения в процессе эксплуатации и условия формирования  $\sigma$ -фазы. Разработана программа оценки склонности сплавов к образованию  $\sigma$ -фазы; даны рекомендации по рациональному использованию никелевых сплавов в зависимости от условий эксплуатации и предъявляемых требований по жаропрочности и коррозионной стойкости.

**тепловая структурная стабильность, жаропрочность, коррозионная стойкость, алюминиевый и хромовый эквиваленты, метод ФАКОМП, пригодность, корреляционно-регрессионный анализ**

**Введение**

Эксплуатационная надежность газотурбинных двигателей определяется соблюдением и выполнением установленных режимов эксплуатации, а также сохранением стабильности структуры и свойств материала за время всего срока службы. Постоянное увеличение температуры газов и действующих напряжений требует повышения физико-механических и эксплуатационных свойств материалов и сохранения их в течение всего ресурса эксплуатации. Эти свойства в значительной степени определяются тепловой структурной стабильностью, жаропрочностью, коррозионной стойкостью. Поэтому исследование взаимосвязи химического состава с указанными свойствами является актуальной задачей и особенно для вновь разрабатываемых (новых) сплавов с учетом специфики их применения.

**Формулирование проблемы**

Для рационального использования никелевых сплавов в ГТД и ГТУ необходим экспериментально-теоретический подход по комплексной оценке пригодности данных материалов с учетом условий эксплуатации.

**Общие соотношения.** В настоящее время отсутствуют однозначные, обоснованные рекомендации по использованию никелевых жаропрочных сплавов для ГТД различного назначения. При этом анализируется влияние отдельных элементов сплава без учета их взаимодействия, т.е. отсутствует системный подход к решению проблемы оптимизации химического состава, структуры и свойств жаропрочных сплавов. Таким образом, изучение всех видов фазовых превращений в жаропрочных сплавах: распад  $\gamma'$ -фазы, карбидные реакции, образование  $\sigma$ -фазы и сверхструктуры типа  $\text{Ni}_2\text{Cr}$ , позволяют более качественно определить пригодность сплава для различных условий эксплуатации.

**Решение проблемы**

В настоящее время на ОАО "НПО "Сатурн" с участием авторов разрабатывается комплексная программа по оценке эксплуатационных свойств никелевых сплавов.

С помощью этой программы можно рассчитать температуру полного растворения  $\gamma'$ -фазы, оценить тепловую структурную стабильность, жаропрочность, коррозионную стойкость, степень склонности

к образованию  $\sigma$ -фазы, степень склонности сплавов к упорядочению. Также планируется включить в эту программу оценку термодинамических свойств сплавов и некоторых других характеристик.

**1. Оценка тепловой структурной стабильности жаропрочных никелевых сплавов на основе анализа критериев двойных диаграмм состояния.**

Для экспериментально-теоретических исследований эксплуатационной пригодности сплавов сформирована рабочая выборка, состоящая из 22 отечественных и зарубежных литейных никелевых сплавов следующих марок: ВЖЛ12У, ВЖЛ14, ЖС6К, ЖС6У, ЖС16, ЖС26, ЖС28, ЖС6Ф, ЖС30, ВЖЛ8, ВЖЛ36Л2, ЦНК-7П, ЧС88У, Udimet-500, Udimet-700, IN100, IN713LC, IN738LC, MAR-M247, MAR-M200, Rene №4, PWA1480.

Учитывая, что жаропрочность сплавов в значительной степени определяется тепловой структурной стабильностью, которую многие авторы [1, 2] предлагают оценивать по температуре полного растворения (Тп.р.)  $\gamma'$ -фазы, разработка физически обоснованной методики расчета значения (Тп.р.)  $\gamma'$ -фазы в зависимости от химического состава сплава является **актуальной задачей.**

В работе [3] нами впервые были использованы обобщенные характеристики (критерии) диаграмм состояния “Ni – легирующий элемент (ЛЭ)”: алюминиевый и хромовый эквиваленты –  $[Al]_{экв}$  и  $[Cr]_{экв}$  соответственно.

Проанализировав данные критерии, получено, что у сплавов с высоким  $[Al]_{экв}$  и низким  $[Cr]_{экв}$  самая высокая Тп.р.  $\gamma'$ -фазы, и, следовательно, эти сплавы обладают наибольшей жаропрочностью, т.е. тепловой структурной стабильностью; и, наоборот, у сплавов с высоким  $[Cr]_{экв}$  и низким  $[Al]_{экв}$  – низкая Тп.р.  $\gamma'$ -фазы, и эти сплавы обладают меньшей тепловой структурной стабильностью, но более высокой коррозионной стойкостью.

Таким образом, рабочую выборку, состоящую из 22 литейных никелевых сплавов, можно условно разделить на две группы (рис. 1):

- сплавы повышенной жаропрочности, для которых  $[Al]_{экв} > 14$ ;  $[Cr]_{экв} < 30,5$ ;
- сплавы повышенной коррозионной стойкости, для которых  $[Al]_{экв} < 14$ ;  $[Cr]_{экв} > 30,5$ .

Исходя из этого, можно предположить, что  $[Al]_{экв}$  характеризует жаропрочность сплавов (тепловую структурную стабильность), а  $[Cr]_{экв}$  – коррозионную стойкость сплавов.

**2. Оценка коррозионной стойкости литейных никелевых сплавов.**

Для более точной оценки коррозионной стойкости воспользуемся параметром, характеризующим сопротивление коррозии, предложенным В.В. Ртищевым [4]:

$$[П]_{кс} = \frac{[Cr]^{1/2}[Ti]}{[Al]}, \quad (1)$$

где  $[Cr]$ ,  $[Ti]$ ,  $[Al]$  – содержание Cr, Ti и Al в сплаве (в % по массе) соответственно.

Показатель коррозионной стойкости рассчитан для всех 22 исследуемых сплавов.

Анализируя полученные значения, можно сказать, что условное деление рабочей выборки на две группы справедливо, так как у сплавов повышенной коррозионной стойкости наблюдается более высокий  $[П]_{кс}$ , чем у сплавов повышенной жаропрочности.

На рис. 2 представлена диаграмма состояния литейных никелевых сплавов в координатах  $[Al]_{экв}$ – $[П]_{кс}$ , на которой видно, что сплавы, имеющие высокий  $[Al]_{экв} > 14$  и низкий  $[П]_{кс} < 2,8$  принадлежат к группе сплавов повышенной жаропрочности; и, наоборот, сплавы, имеющие высокий  $[П]_{кс} > 2,8$  и низкий  $[Al]_{экв} < 14$  относятся к группе сплавов повышенной коррозионной стойкости. Таким образом, с помощью  $[Al]_{экв}$  и  $[П]_{кс}$  можно более точно классифицировать литейные никелевые сплавы на две группы: жаропрочные и коррозионностойкие.

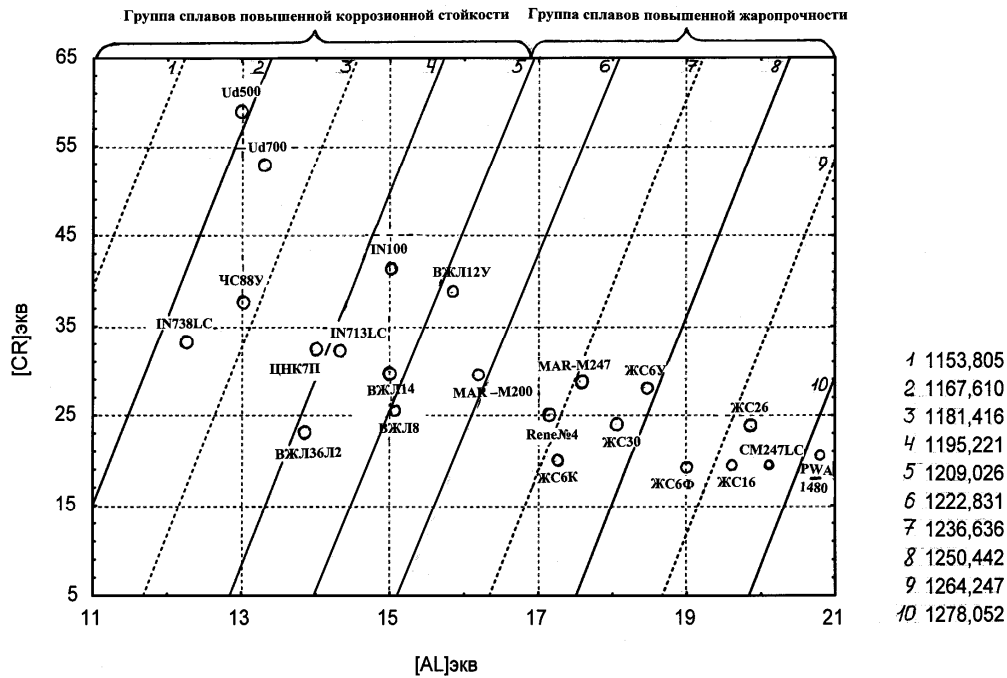


Рис. 1. Диаграмма [Al]экв – [Cr]экв для литейных никелевых сплавов

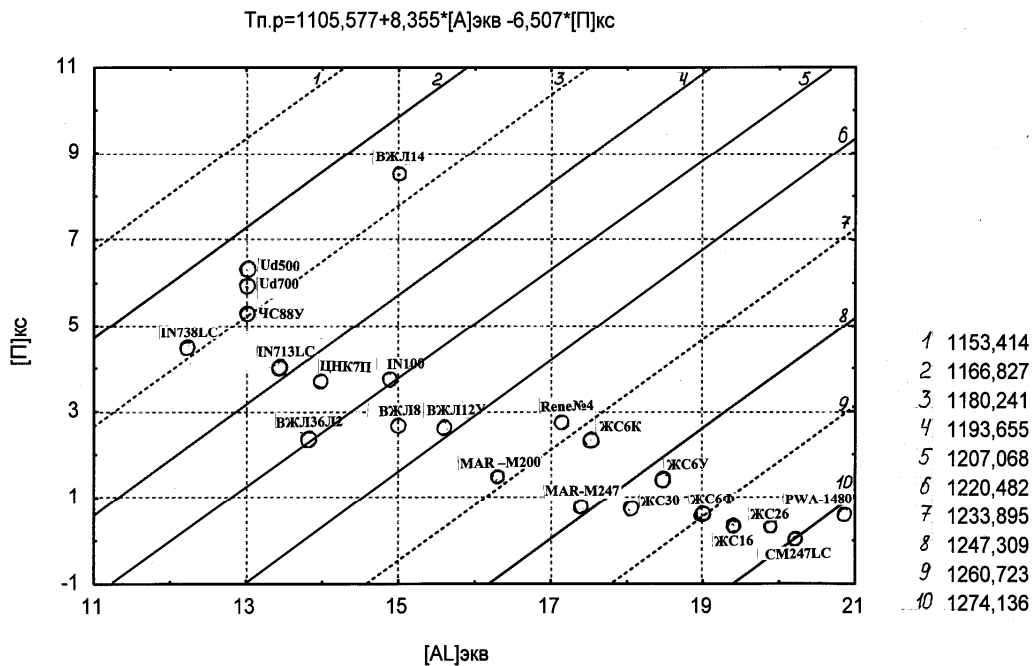


Рис. 2. Диаграмма [Al]экв – [П]кС для литейных никелевых сплавов

**3. Расчет тепловой структурной стабильности сплавов по методу ФАКОМП.** Одной из наиболее опасных причин снижения эксплуатационных свойств жаропрочных сплавов является образование  $\sigma$ -фазы. Наиболее интенсивно  $\sigma$ -фаза образуется при температурах 800 – 950 °С, т.е. это наиболее опасный интервал температур при эксплуатации.

Для оценки склонности сплавов к образованию  $\sigma$ -фазы использовали известный метод ФАКОМП [1].

Для выполнения расчетов разработана программа на языке “Паскаль” по рекомендациям [1]. Блок-схема алгоритма расчета по методу ФАКОМП представлена на рис. 3.

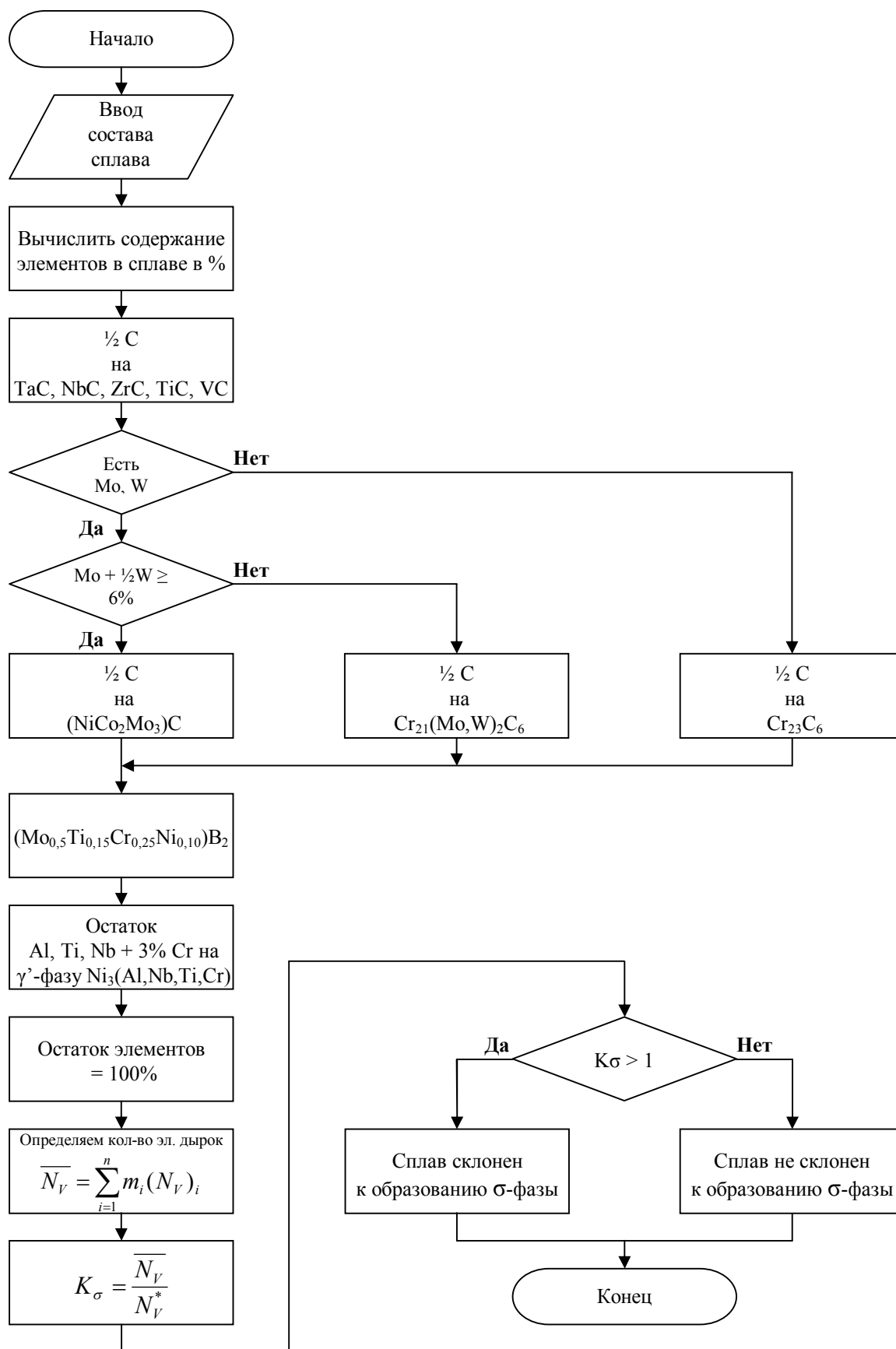


Рис. 3. Блок-схема алгоритма расчета по методу ФАКОМП

В качестве предельно-допустимого значения было принято  $N^*_{эд} = 2,5$ . При условии, если  $N_{эд} > N^*_{эд} = 2,5$ , сплав склонен к образованию  $\sigma$ -фазы и его работоспособность в процессе эксплуатации снижается.

Был проведен анализ рабочей выборки. Расчет количества электронных дырок в  $\gamma$ -твердом растворе  $N_{эд}$  проводили для максимального, минимального и среднего химического состава каждого сплава в соответствии с ТУ.

Проанализировав полученные данные можно сказать, что у сплавов с химическим составом на максимально-допустимых концентрациях, самая высокая степень склонности к образованию  $\sigma$ -фазы. Поэтому для обеспечения структурной стабильности необходимо, чтобы сплав имел оптимальный химический состав.

В результате обработки данных нами предложено соотношение  $\Sigma(\text{Cr, Co, Mo, W})/\Sigma(\text{Al, Ti, Nb})$  для оценки степени склонности сплава к образованию  $\sigma$ -фазы. Это соотношение составлено с учетом того, что Cr, W, Co и Mo входят в состав  $\sigma$ -фазы и при определенном стехиометрическом соотношении способствуют ее образованию. Кроме того, эти элементы переходят в  $\gamma$ -твердый раствор в результате карбидных превращений и распада неустойчивых карбидов  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{Mo}_6\text{C}$ ,  $\text{WC}$ ,  $\text{Co}_2\text{C}$ .

Таким образом, для группы сплавов повышенной жаропрочности отношение

$$\frac{\Sigma(\text{Cr, Co, Mo, W})}{\Sigma(\text{Al, Ti, Nb})} < 1,6,$$

при этом условии  $\sigma$ -фаза не должна образоваться для данной группы сплавов.

Если же  $\Sigma(\text{Cr, Co, Mo, W})/\Sigma(\text{Al, Ti, Nb}) > 1,6$ , то сплавы склонны к образованию  $\sigma$ -фазы.

Для группы сплавов повышенной коррозионной стойкости отношение

$$\frac{\Sigma(\text{Cr, Co, Mo, W})}{\Sigma(\text{Al, Ti, Nb})} < 2,77,$$

при этом условии  $\sigma$ -фаза не должна образоваться для данной группы сплавов.

Если же  $\Sigma(\text{Cr, Co, Mo, W})/\Sigma(\text{Al, Ti, Nb}) > 2,77$ , то сплавы склонны к образованию  $\sigma$ -фазы.

Используя данные соотношения, можно достаточно быстро, по результатам химического анализа оценить склонность сплава к образованию  $\sigma$ -фазы, т.е. дать качественную оценку его эксплуатационной надежности в дополнении к методу ФАКОМП.

**4. Термодинамическая оценка тепловой структурной стабильности сплавов.** Термодинамика и кинетика процессов взаимодействия карбидов с  $\gamma$ -матрицей сплава позволяет определить оптимальную морфологию, структуру и состав карбидов, а, следовательно, и механические свойства жаропрочных сплавов. В литейных сплавах типа ЖС образуются следующие типы карбидов:  $\text{MeC}$  ( $\text{TaC}$ ,  $\text{TiC}$ ,  $\text{NbC}$ ,  $\text{ZrC}$ ,  $\text{WC}$ ),  $\text{Me}_2\text{C}$  ( $\text{Mo}_2\text{C}$ ,  $\text{Co}_2\text{C}$ ),  $\text{Me}_6\text{C}$  и  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ . Указанные карбиды имеют различное морфологическое строение и физико-механические свойства, следовательно, они оказывают неодинаковое влияние на механические свойства сплавов.

В работах [1, 5] приводятся различные температуры карбидных превращений, что объясняется влиянием химического состава и степенью метастабильности структуры сплава. Поэтому представляет интерес провести термодинамический расчет сравнительной устойчивости карбидов с целью предварительной оценки возможности структурных превращений, происходящих в сплаве в процессе эксплуатации в условиях повышенных температур.

Расчет изменения свободной энергии  $\Delta G$  проводили с учетом того, что продукты распада карбидов – металл и углерод находились не в чистом виде, а в

растворе никеля, такое состояние элементов обозначим как [Me], [C]. Это позволяет получить более достоверную оценку процессов взаимодействия карбидов с  $\gamma$ -матрицей сплава.

Реакции разложения карбидов в  $\gamma$ -матрице и соответствующие выражения для расчета изменения свободной энергии  $\Delta G$ , Дж имеют вид:

$$\begin{aligned} \text{TaC} &= [\text{Ta}] + [\text{C}]; \\ \Delta G1 &= 80179 - 79,3T; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{TiC} &= [\text{Ti}] + [\text{C}]; \\ \Delta G2 &= 75267 - 83,5T; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{NbC} &= [\text{Nb}] + [\text{C}]; \\ \Delta G3 &= 45000 - 90,5T; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{VC} &= [\text{V}] + [\text{C}]; \\ \Delta G4 &= 39374 - 91,7T; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{WC} &= [\text{W}] + [\text{C}]; \\ \Delta G5 &= 20034 - 105,9T; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{Co}_2\text{C} &= 2[\text{Co}] + [\text{C}]; \\ \Delta G6 &= 4536 - 137,5T; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{Mo}_2\text{C} &= 2[\text{Mo}] + [\text{C}]; \\ \Delta G7 &= 34005 - 188T; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} 1/6 \text{Cr}_{23}\text{C}_6 &= 23/6[\text{Cr}] + [\text{C}]; \\ \Delta G8 &= 100070 - 215T. \end{aligned} \quad (9)$$

Анализ температурных зависимостей  $\Delta G$  показывает, что наиболее термодинамически устойчивыми карбидами в никелевых сплавах являются карбиды типа MeC. Из них наиболее устойчивым является TaC, а наименее устойчивыми –  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{Mo}_2\text{C}$ ,  $\text{Co}_2\text{C}$ .

Таким образом, такие элементы как хром, молибден, кобальт, переходя в твердый  $\gamma$ -раствор, могут способствовать формированию  $\sigma$ -фазы в соответствии с ее стехиометрическим составом  $(\text{Cr}, \text{Mo}, \text{W})_x(\text{Ni}, \text{Co})_y$ . Учитывая также, что решетка  $\sigma$ -фазы когерентна решетке карбида  $\text{Cr}_{21}\text{Mo}_2\text{C}_6$  [1], можно

утверждать, что формирование  $\sigma$ -фазы на карбидах  $\text{Me}_{23}\text{C}_6$  наиболее вероятно.

В результате проведенных термодинамических расчетов можно сделать следующие выводы. В процессе разложения карбидов хрома и молибдена (как менее термостабильных)  $\gamma$ -раствор обогащается хромом и молибденом.

Это создает благоприятные условия для образования пластин  $\sigma$ -фазы в  $\gamma$ -растворе на остатках карбида  $\text{Me}_{23}\text{C}_6$ . Для уменьшения вероятности ее образования желательно иметь меньшее количество термодинамически неустойчивых карбидов хрома и молибдена. Этого, очевидно, можно достигнуть при минимальном содержании в сплаве хрома и молибдена.

Для предотвращения образования избыточной карбидной фазы  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  предложено [6] вводить в состав жаропрочных сплавов ниобий.

Установлено, что энергия активации растворения карбидов NbC почти в два раза выше, чем для карбидов  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ , что благоприятно влияет на повышение тепловой структурной стабильности сплава.

**5. Оценка склонности сплавов к упорядочению.** В ряде работ показано, что снижение эксплуатационных свойств в сплаве (понижение пластичности) обусловлено процессами упорядочения, т.е. образованием упорядоченной сверхструктуры типа  $\text{Ni}_2\text{Cr}$ . Механизм упорядочения рассмотрен в работах [7, 8]. При этом предложена оценка склонности сплава к упорядочению по соотношению:

$$Z = \frac{\text{Ni} + \text{Co}}{\text{Cr} + \text{W} + \text{Mo} + \text{Nb}} \text{ ат \%} \leq 3, \quad (10)$$

если  $Z [3 (\% \text{ат})]$ , то сплав склонен к дальнейшему упорядочению.

Для расчета значений критерия  $Z$  использовались данные, полученные в результате ФАКОМП-анализа, где содержание элементов в атомных %

соответствует составу итогового аустенита ( $\gamma$ -матрицы) после выделения из него  $\gamma_9$ -фазы.

Из анализа полученных данных можно сделать вывод, что все сплавы в разной степени склонны к упорядочению, что объясняется присутствием хрома.

В процессе эксплуатации происходят карбидные реакции, что приводит к обогащению  $\gamma$ -твердого раствора такими элементами, как Cr, Mo, W. Это создает благоприятные условия для образования пластин  $\sigma$ -фазы или сверхструктуры типа  $Ni_2Cr$ .

Можно предположить, что сначала образуется сверхструктура  $Ni_2Cr$ , так как в первую очередь идет распад карбидов хрома, а в процессе дальнейшей эксплуатации происходит обогащение  $\gamma$ -матрицы Mo, W, Co, которым выгодно уйти из раствора, что увеличивает вероятность появления  $\sigma$ -фазы, для которой центром образования может служить сверхструктура типа  $Ni_2Cr$ .

### Заключение

Таким образом, в работе показана принципиальная возможность создания комплексной оценки эксплуатационной пригодности жаропрочных никелевых сплавов с учетом специфики их применения.

Результаты работы могут быть рекомендованы для использования в лабораториях контроля качества и надежности продукции и проектных организациях по выпуску ГТД различного назначения.

В настоящее время в Отделе Главного Metallурга Опытного Завода ОАО НПО «Сатурн» принята к опробованию методика комплексной оценки никелевых сплавов для изготовления деталей горячего тракта различных изделий ГТД и ГПУ.

По разработанной автором программе, согласно методу ФАКОМП, проведена оценка склонности

сплавов типа ЖС6У, ЖС6Ф, ЧС88У, ЦНК-7П, ВЖ159, ЭП648 и др. к образованию  $\sigma$ -фазы.

### Литература

1. Симс Ч., Хагель В. Суперсплавы I / Пер. с англ. – М.: Metallургия, 1995. – 384 с.
2. Машиностроение. Энциклопедия т. II – III / И.Н. Фриндлярдер, О.Г. Сенаторова, О.Е. Осинцов и др. – М.: Машиностроение, 2001. – 880 с.
3. Жуков А.А., Смирнова О.А. Оценка температуры полного растворения  $\gamma'$ -фазы жаропрочных никелевых сплавов на основе анализа двойных диаграмм состояния // Заготовительные производства в машиностроении. – 2004. – № 11. – С. 44 – 47.
4. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов / Р.Е. Шалин, И.Л. Светлов, Е.Б. Качанов и др. – М.: Машиностроение, 1997. – 336 с.
5. Жаропрочность литейных никелевых сплавов и защита их от окисления. / Б.Е. Патон, Г.Б. Строганов, С.Т. Кишкин и др. – К.: Наук. Думка, 1987. – 256 с.
6. Кишкин С.Т., Строганов Г.Б., Логунов А.В. Литейные жаропрочные сплавы на никелевой основе. – М.: Машиностроение, 1987. – 111 с.
7. Ртищев В.В., Винтайкин Е.З. Дальнее упорядочение матрицы сложнолегированных жаропрочных сплавов на никелевой основе // Физика металлов и металловедение. – 1977. – Т. 43. – С. 48 – 51.
8. Левин Е.Е. Структура, фазовые превращения и проблема ресурса сплавов на Ni основе // Жаропрочность и жаростойкость металлических материалов. – 1976. – С. 104.

*Поступила в редакцию 24.05.2005*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.