



## ПОЛУЧЕНИЕ ПРОГНОЗИРУЮЩИХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛИТЕЙНЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

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

<sup>1</sup>Запорожский национальный технический университет (ЗНТУ)  
69063, г. Запорожье, ул. Жуковского, 64. E-mail: rector@zntu.edu.ua

<sup>2</sup>ООО «Патон Турбайн Текнолоджиз»  
03028, г. Киев, ул. Ракетная, 26. E-mail: VKurenkova@patontt.com

Проанализированы и обработаны экспериментальные данные термодинамических параметров широкого ряда отечественных и зарубежных литейных жаропрочных никелевых сплавов пяти поколений. Получены математические регрессионные модели для прогнозирующих расчетов термодинамических параметров, которые могут использоваться при разработке новых перспективных сплавов или модернизации существующих промышленных сплавов. Библиогр. 25, табл. 2, ил. 5.

*Ключевые слова:* литейные жаропрочные никелевые сплавы; система легирования; термодинамические параметры; математическая регрессионная модель

Совершенствование составов существующих промышленных литейных жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС) и разработка сплавов нового поколения нацелены на поиск перспективных композиций, обеспечивающих оптимальное сочетание необходимых свойств и достаточный уровень работоспособности сплавов при эксплуатации. Однако повышение свойств требует увеличения легированности современных жаропрочных систем и может достигать 40...50 мас. %. Это приводит к повышению термодинамической неустойчивости и развитию процессов, обуславливающих изменение структуры и свойств.

Основные характеристики сплавов каждого класса можно разделить на термофизические, механические, технологические и эксплуатационные [1–3]. Химический состав и, соответственно, структурные и фазовые особенности и термодинамические процессы, протекающие в системах сплавов, определяют данные свойства. Поэтому получение оптимальных композиций легирующих составляющих в ЖНС является необходимой задачей.

Современные сплавы представляют собой сложные образования по химическому, фазовому составу и структуре. Однако сформированная структура не является определяющим фактором, т.к. в процессе эксплуатации сплав, прежде всего,

должен противостоять внешним воздействиям. Следовательно, главным выступает структурная стабильность, которая существенным образом определяет жаропрочность, надежность и долговечность сплава, т.е. сохранение его свойств при эксплуатации в любых условиях (изменение напряжений, температуры, агрессивной среды) [4].

Стабильность фаз и структуры наиболее полно можно оценить исследуя совместно термодинамические и кинетические свойства, т.е. параметры, определяющие равновесие в системе и контролирующие скорость процессов, ведущих к структурным изменениям, в особенности процессов диффузии, деградации и т.д.

Цель данной работы — создание на основе анализа и обработки экспериментальных данных широкого номенклатурного ряда отечественных и зарубежных литейных ЖНС универсальных прогнозирующих математических регрессионных моделей, наиболее точно описывающих зависимость термодинамических параметров от химического состава. Выбор обусловлен тем, что сплавы от первого до пятого поколений охватывают широкую область систем легирования по основным элементам, мас. %: 2,5...22,5 Cr; 0...15 Co; 0...12 W; 0...6 Mo; 0...5 Ti; 2,5...6,5 Al; 0...3 Nb; 0...12 Ta; 0...2 Hf; 0...9 Re; 0...6 Ru; 0...1 V. Следует отметить, что среди них имеются сплавы в

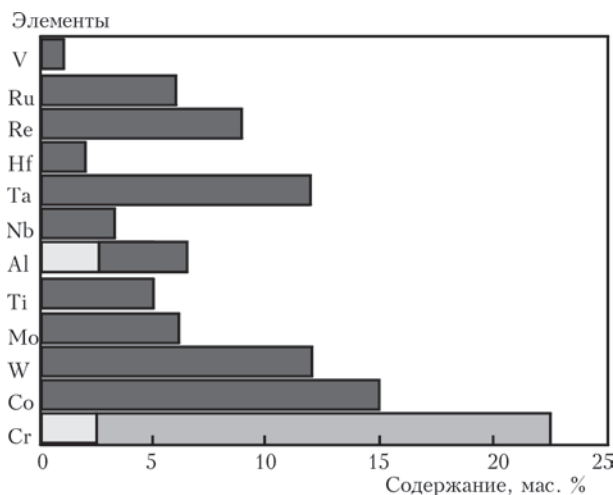


Рис. 1. Содержание основных легирующих элементов в исследуемых литейных ЖНС

составе которых отсутствуют какие-либо легирующие элементы.

Исследовали 32 литейных ЖНС, которые выбирали с позиций достоверного экспериментального определения их химического состава и термодинамических параметров от уровня, характера и степени легирования [4–12] (табл. 1). Диапазон содержания основных легирующих элементов, охватывающих системы легирования ЖНС 5-ти поколений, показан на рис. 1.

**Анализ результатов.** В данной работе представлены исследования по определению зависимостей термодинамических параметров от химического состава для широкого ряда литейных ЖНС. До настоящего времени для определения величины и зависимости термодинамических параметров от химического состава литейных ЖНС применяли экспериментальные методы [4–15]. Для прогнозирующих расчетов температурных параметров сплавов данного класса используются уравнения многофакторной регрессии, полученные методом множественного регрессионного анализа, и как показала практика, требующие дальнейшего совершенствования [1–3, 16, 17]. В последнее время для аналитических расчетов применяется метод CALPHAD [18–21], эффективность которого заключается в достаточно быстром дополнении недостающих экспериментальных данных и получении достоверных прогнозирующих расчетов таких параметров, как критическая температура и температурный интервал фазовых превращений. Данный метод основан на надежных физических принципах, которые имеют ряд значительных преимуществ по сравнению со статистическими методами. В данной работе реализован комплексный подход к обработке экспериментальных данных с применением синтеза расчетно-аналитических

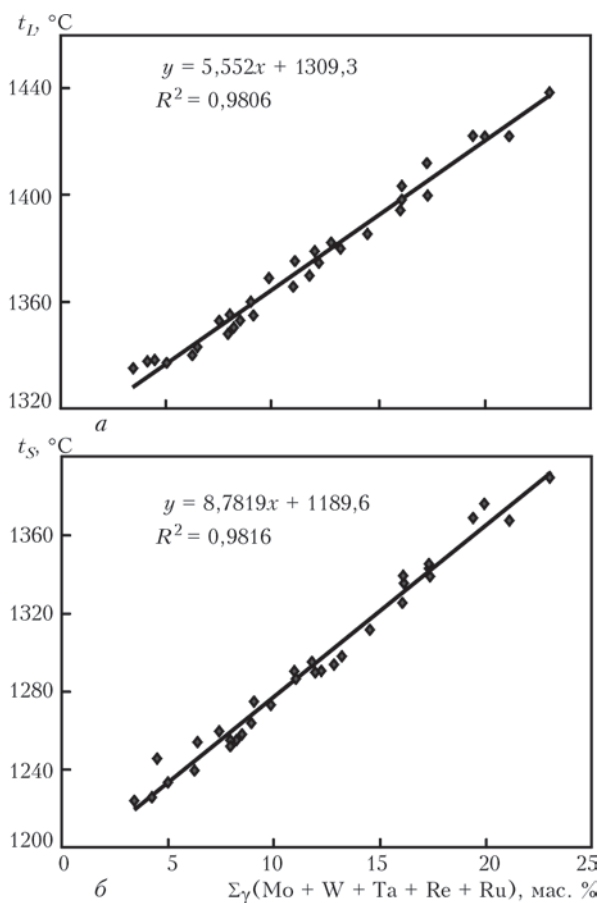


Рис. 2. Зависимость  $t_L$  (а) и  $t_S$  (б) литейных ЖНС от суммарного количества легирующих упрочнителей  $\gamma$ -твердого раствора

методов, что позволило получить более адекватные и универсальные прогнозирующие математические модели для широкого ряда литейных ЖНС. Химический состав 32-х исследованных литейных ЖНС представлен в табл. 1 [4–6, 8–15].

Как известно, интервал кристаллизации  $\Delta t_{кр} = t_L - t_S$  ( $t_L, t_S$  — температуры ликвидус и солидус соответственно) определяет склонность сплава к дендритной ликвации, а также склонность к образованию микропористости, оказывающей негативное влияние на механические свойства. Чем меньше интервал кристаллизации  $\Delta t_{кр}$ , тем меньше ликвация, однороднее сплав по химическому составу и гомогеннее его структура, т.е. уменьшается различие химического состава осей закристаллизовавшихся дендритов и междендритных объемов. Значение  $t_S$  в определенной степени ограничивает максимально возможную рабочую температуру сплавов. Таким образом, чем выше значение  $t_S$ , тем выше работоспособность сплава при повышенной температуре.

Из рис. 2, а, б видно, что значения температур  $t_L$  и  $t_S$  в литейных ЖНС в первую очередь зависят от суммарного содержания  $\gamma$ -упрочнителей твердого раствора — элементов с обратной (отрица-



Таблица 1. Химический состав литейных ЖНС, мас. %

Марка сплава	C	Cr	Co	Al	Ti	Mo	W	Nb	Ta	Hf	V	Re	Ru	Zr	B
TMS-71	–	6,0	6,0	5,7	–	6,4	–	–	8,4	–	–	2,5	–	–	–
ЗМИ-3У	0,12	13,3	5,0	3,4	4,8	0,9	7,3	–	–	–	–	–	–	–	0,015
CMSX-10	–	2,0	3,0	5,7	0,2	0,4	5,0	0,1	8,0	0,03	–	6,0	–	–	–
ЖС32	0,15	5,0	9,0	6,0	–	1,0	8,3	1,5	4,0	–	–	4,0	–	–	0,015
ЖС6К	0,18	10,6	4,5	5,7	2,8	4,0	5,1	–	–	–	–	–	–	0,04	0,015
ЖС6У	0,16	8,8	9,8	5,6	2,4	1,8	10,3	1,0	–	–	–	–	–	0,04	0,025
ЖС26	0,15	4,9	9,0	5,9	1,0	1,1	11,7	1,6	–	–	1,0	–	–	–	0,015
ЗМИ-3У-М1*	0,05	11,5	5,0	3,6	4,5	0,8	7,0	–	4,0	–	–	–	–	–	0,008
ЧС70	0,09	15,8	10,7	2,8	4,6	2,0	5,5	0,2	–	–	–	–	–	0,05	0,02
ВЖМ-1	–	2,5	11,0	5,8	–	2,0	1,3	–	8,8	–	–	9,0	–	–	–
ВЖМ-4	0,008	2,5	6,0	6,0	–	4,0	4,0	–	4,5	–	–	6,5	4,0	–	0,004
ЖС3ЛС	0,09	16,0	5,0	2,7	2,7	4,0	4,0	–	–	–	–	–	–	0,015	0,015
ЖС3ЛС-М*	0,10	14,5	4,5	3,0	3,0	2,0	6,5	–	2,5	0,3	–	–	–	0,015	0,015
ЖС32Э	0,07	5,0	5,5	6,0	–	0,6	6,7	0,8	8,0	–	–	2,0	–	0,025	0,010
ВЖЛ12Э	0,18	9,4	9,0	5,4	4,5	3,1	1,4	0,75	–	–	0,75	–	–	0,020	0,011
CMSX-4	–	6,5	9,0	5,6	1,0	0,6	6,0	–	6,5	0,10	–	3,0	–	–	–
IN-939	0,15	22,5	19,0	1,9	3,7	–	2,0	1,0	1,4	–	–	–	–	0,100	0,010
GTD-111	0,10	14,0	9,5	3,0	5,0	1,5	4,0	–	3,0	0,15	–	–	–	0,030	0,010
IN-738	0,10	16,0	8,5	3,4	3,4	1,75	2,6	0,9	1,75	–	–	–	–	0,050	0,010
U-500	0,07	18,0	19,0	3,0	3,0	4,2	–	–	–	–	–	–	–	0,05	0,007
U-700	0,06	15,5	17,0	4,7	3,5	5,0	–	–	–	–	–	–	–	0,02	0,030
Rene N5	0,05	7,0	7,5	6,2	–	1,5	5,0	–	6,6	0,15	–	3,0	–	–	0,004
Rene N6	0,05	4,2	12,5	5,75	–	1,4	6,0	–	7,2	0,15	–	5,4	–	–	0,004
CM186LC	0,07	6,0	9,0	5,7	0,7	0,5	8,0	–	3,0	1,4	–	3,0	–	0,005	0,015
CM247LC	0,07	8,1	9,2	5,6	0,7	0,5	9,5	–	3,2	1,4	–	–	–	0,015	0,015
Rene 80	0,17	14,0	9,5	3,0	5,0	4,0	4,0	–	–	–	–	–	–	0,030	0,015
PWA 1422	0,14	9,0	10,0	5,0	2,0	–	12,0	1,0	–	1,5	–	–	–	0,050	0,015
PWA 1480	–	10,0	5,0	5,0	1,5	–	4,0	–	12,0	–	–	–	–	–	–
ЖСКК-1	0,10	14,0	9,0	4,0	4,0	2,0	4,0	1,0	0,5	–	–	–	–	–	0,015
ЖСКК-2	–	13,5	9,5	4,1	3,8	2,0	4,1	–	2,0	–	–	1,0	–	–	–
CMSX-11B	0,002	12,5	7,0	3,6	4,2	0,5	5,6	0,01	5,0	0,004	–	–	–	0,001	0,002
CMSX-11C	0,002	14,9	3,0	3,4	4,2	0,4	4,5	0,01	5,0	0,004	–	–	–	0,001	0,002

\*Сплавы ЗМИ-3У-М1 и ЖС3ЛС-М разработаны в ЗНТУ и внедрены в промышленное производство на ЗМКБ «Ивченко-Прогресс» и АО «Мотор Сич».

тельной) ликвацией таких как Mo, W, Ta, Re, Ru (тантал — исключение). Чем больше суммарное содержание упрочнителей  $\gamma$ -твердого раствора, тем выше значения  $t_L$  и  $t_S$  сплава.

На основе проведенных исследований для  $t_L$  и  $t_S$  получены адекватные математические регрессионные модели для пяти поколений ЖНС, которые имеют вид аппроксимирующих прямых, описываемых уравнениями:  $t_L = 5,552\Sigma\gamma + 1309,3$  с ко-

эффициентом детерминированности  $R^2 = 0,9806$  (рис. 2, а);  $t_S = 8,7819\Sigma\gamma + 1189,6$  с коэффициентом детерминированности  $R^2 = 0,9816$  (рис. 2, б).

Микроструктура жаропрочных сплавов представляет собой систему матричного высоколегированного  $\gamma$ -твердого раствора, в которой регулярно распределена основная упрочняющая  $\gamma'$ -фаза (дисперсного вида), а также имеют место первичная укрупненная  $\gamma'$ -фаза,  $\gamma$ - $\gamma'$ -эвтектики и различ-

Таблица 2. Химический состав структурных составляющих жаропрочного сплава IN 738 (рис. 4)

Spectrum	C	Al	Ti	Cr	Co	Ni	Nb	Mo	Ta	W
Spectrum 1	3,62	2,29	3,92	17,02	8,38	58,82	1,08	2,70	1,11	1,06
Spectrum 2	3,86	4,40	9,03	3,13	5,28	70,69	1,25	0,38	1,58	0,40
Spectrum 3	19,09	-	22,42	0,68	0,27	1,86	30,46	2,15	20,84	2,22
Spectrum 4	3,38	1,67	2,31	22,52	10,06	54,46	0,59	3,41	0,69	0,91
Spectrum 5	16,01	-	18,91	10,41	0,52	3,04	22,89	4,06	21,96	2,18
Spectrum 6	17,15	-	23,64	0,81	0,44	2,81	28,69	1,20	24,47	0,78
Spectrum 7	17,78	-	22,13	2,06	0,96	4,7	26,11	0,74	24,82	0,70

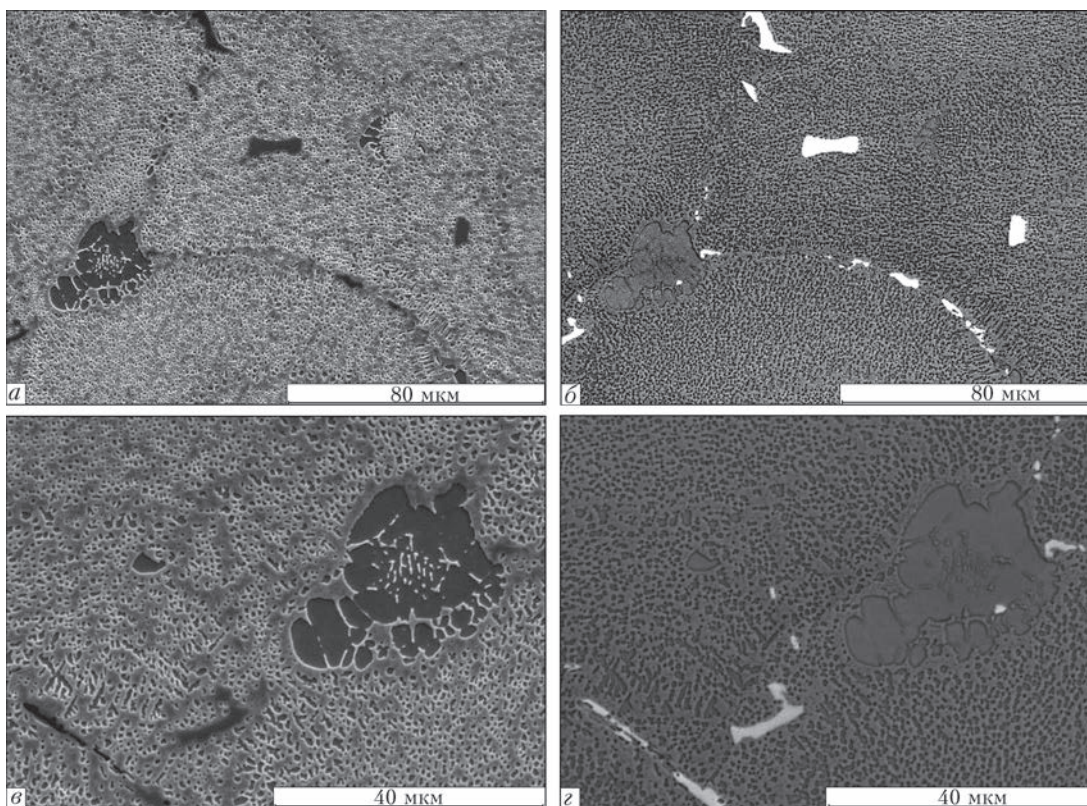


Рис. 3. Микроструктура никелевого жаропрочного сплава ( $\times 500, 1000$ ): а, в — SEI; б, г — BEI

ные типы карбидных фаз ( $MeC$ ,  $Me_6C$ ,  $Me_{23}C_6$ ), а также бориды. Пример типичной микроструктуры и химического состава основных фаз представлены на рис. 3, 4, табл. 2.

Уровень высокотемпературной работоспособности ЖНС определяется в первую очередь их структурной и фазовой стабильностью, которая в основном зависит от таких термодинамических параметров, как температура начала ( $t_{пр}^{\gamma'}$ ) и полного растворения ( $t_{пр}^{\gamma}$ ) основной упрочняющей  $\gamma'$ -фазы, а также температура локального оплавления эвтектики  $\gamma$ - $\gamma'$  ( $t_{эвт}$ ). Для каждого сплава

данные значения индивидуальны и определяют уровень термодинамической структурной и фазовой стабильности и, соответственно, высокотемпературную жаропрочность и долговечность при рабочих температурах.

В настоящее время рабочие температуры газотурбинных двигателей достигли уровня значений близких к температурному интервалу растворения основной упрочняющей  $\gamma'$ -фазы.

Из рис. 5 видно, что значения температур  $t_{пр}^{\gamma'}$  и  $t_{пр}^{\gamma}$  основной упрочняющей  $\gamma'$ - фазы, а также температура плавления эвтектики  $\gamma$ - $\gamma'$  ( $t_{эвт}$ ) в литейных ЖНС в первую очередь зависит от суммарного содержания в сплавах  $\gamma'$ -образующих элементов, обладающих прямой (положительной) ликвацией, а именно Al, Ti, Nb, Ta, Hf [7]. Чем больше суммарное содержание  $\gamma'$ -образующих элементов, тем выше значения  $t_{пр}^{\gamma'}$ ,  $t_{пр}^{\gamma}$  и  $t_{эвт}$  сплава. Следует отметить, что  $t_{пр}^{\gamma'}$  упрочняющей  $\gamma'$ -фазы у исследованных литейных ЖНС находится в достаточно узком температурном интервале (рис. 5, а).

Наиболее важной термодинамической характеристикой сплава, отвечающей за уровень высокотемпературной жаропрочности, является температура  $t_{пр}^{\gamma'}$  упрочняющей  $\gamma'$ -фазы [4, 22]. Анализ приведенной математической модели (рис. 5, б) подтвердил влияние  $\gamma'$ -образующих элементов на темпера-

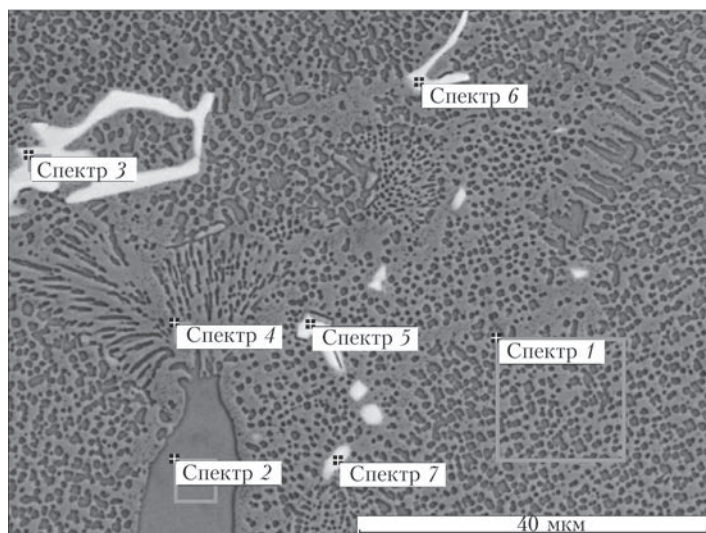


Рис. 4. Микроструктура жаропрочного сплава IN 738 и зоны проведения энергодисперсионного анализа



туру полного растворения  $\gamma'$ -фазы. С увеличением их количества температура прямо пропорционально возрастает. Менее активное, но положительное влияние на повышение  $t_{\text{пр}}^{\gamma'}$  оказывают и  $\gamma$ -упрочнители твердого раствора (Mo, W, Re, Ru).

Предельной границей, определяющей эксплуатационные возможности сплава, наряду с  $t_{\text{пр}}^{\gamma'}$ , является температура локального плавления структурных составляющих, а именно температура плавления эвтектики  $\gamma$ - $\gamma'$  ( $t_{\text{эвт}}$ ) (рис. 5, в). В работах [4–6] показано, что при легировании гафнием  $t_{\text{эвт}}$  может быть ниже  $t_{\text{пр}}^{\gamma'}$   $\gamma'$ -фазы, т.е. гафний не только положительно влияет на структуру и свойства сплавов, но и, как сильно ликвирующий элемент, оказывает отрицательное воздействие на их термическую стабильность [7, 8]. В этом случае величина температурного интервала для проведения эффективной термообработки  $\Delta t_{\text{то}}$  будет иметь отрицательное значение, а проведение гомогенизации сплава может привести к оплавлению локальных микрообъемов и, соответственно, разупрочнению сплавов вследствие увеличения их структурной неоднородности и дефектности, что может приводить к снижению прочностных и усталостных характеристик.

Таким образом, температура плавления эвтектики  $\gamma$ - $\gamma'$  ( $t_{\text{эвт}}$ ) также является важной характеристикой ЖНС, поскольку ограничивает верхний предел температурного интервала  $\Delta t_{\text{то}}$  для проведения термической обработки (гомогенизации). Нижней предельной границей, определяющей ширину технологического температурного интервала для проведения термической обработки, является  $t_{\text{пр}}^{\gamma'}$  основной упрочняющей  $\gamma'$ -фазы:  $\Delta t_{\text{то}} = t_{\text{эвт}} - t_{\text{пр}}^{\gamma'}$ .

В связи с этим при разработке перспективных или модернизации существующих промышленных сплавов следует учитывать данное условие и обеспечивать необходимую достаточную ширину температурного интервала  $\Delta t_{\text{то}}$  для проведения эффективной гомогенизации  $t_{\text{гом}} = t_{\text{пр}}^{\gamma'} + \Delta t_{\text{то}}/2$ . Следует отметить, что если величина  $t_{\text{пр}}^{\gamma'}$   $\gamma'$ -фазы находится достаточно близко к величине  $t_{\text{эвт}}$ , то в этом случае часто применяют медленный ступенчатый нагрев с временными выдержками при выходе на температурный режим гомогенизации  $t_{\text{гом}}$ .

Эвтектические превращения — это сложные термодинамические процессы, которые могут протекать одновременно, накладываясь друг на друга в определенном температурном диапазоне. Поэтому часто для литейных жаропрочных никелевых сплавов эти температурные пороги определяются экспериментально методом дифференциального термического анализа (ДТА) посредством изуче-

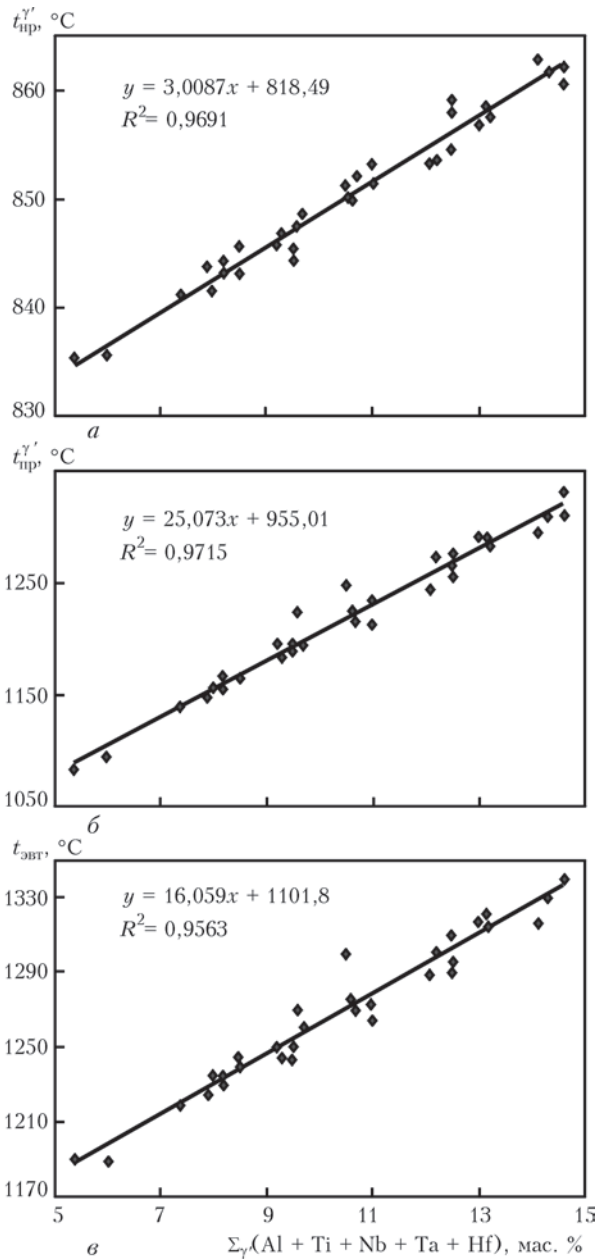


Рис. 5. Зависимость  $t_{\text{пр}}^{\gamma'}$  (а),  $t_{\text{пр}}^{\gamma'}$  (б) и  $t_{\text{эвт}}$  (в) от суммарного содержания  $\gamma'$ -стабилизирующих элементов

ния ДТА-кривых, получаемых при нагреве (плавлении) и охлаждении (кристаллизации) [22–25].

Следует отметить, что элементы, упрочняющие  $\gamma$ -твердый раствор, обладают более низкой диффузионной подвижностью, тем самым значительно тормозя диффузионные процессы при высоких температурах, связанные как с растворением основной упрочняющей  $\gamma'$ -фазы, так и со скоростью коагуляции ее дисперсных выделений, что определенно влияет как на скорость деградации структуры, так и на жаропрочность.

В результате проведенных исследований для температур  $t_{\text{пр}}^{\gamma'}$  и  $t_{\text{пр}}^{\gamma'}$  основной упрочняющей ЖНС  $\gamma'$ -фазы, а также температуры плавления эвтектики  $\gamma$ - $\gamma'$  ( $t_{\text{эвт}}$ ) получены адекватные аппроксимирующие математические регрессионные мо-



дели, адаптированные для пяти поколений литейных ЖНС, которые имеют вид:  $t_{\text{пр}}^{\gamma'} = 3,0087\Sigma\gamma' + 818,49$  с коэффициентом детерминированности  $R^2 = 0,9691$ ;  $t_{\text{пр}}^{\gamma'} = 25,073\Sigma\gamma' + 955,01$  с  $R^2 = 0,9715$ ;  $t_{\text{эвт}} = 16,059\Sigma\gamma' + 1101,8$  с  $R^2 = 0,9563$ .

Было установлено, что полученные математические модели позволяют с высокой степенью достоверности проводить прогнозирующие расчеты термодинамических параметров как для новых перспективных составов, так и для модернизации существующих сплавов, а также прогнозировать другие важные температурные параметры сплавов: ширину интервала кристаллизации  $\Delta t_{\text{кр}} = t_L - t_S$ , которая определяет склонность сплавов к дендритной ликвации; рабочую температуру  $t_{\text{раб}}$  сплавов определенного класса, которая определяется в первую очередь структурной и фазовой стабильностью и зависит от значений  $t_{\text{пр}}^{\gamma'}$  и в большей степени  $t_{\text{пр}}^{\gamma'}$  основной упрочняющей  $\gamma'$ -фазы; температурный интервал проведения гомогенизации, который зависит от температуры плавления эвтектики  $\gamma$ - $\gamma'(t_{\text{эвт}})$ , что и определяет ширину технологического интервала  $\Delta t_{\text{го}} = t_{\text{эвт}} - t_{\text{пр}}^{\gamma'}$ , а также оптимальную температуру гомогенизации для сплавов  $t_{\text{го}} = t_{\text{пр}}^{\gamma'} + \Delta t_{\text{го}}/2$ .

Для каждого сплава данные температурные параметры являются индивидуальными, которые в конечном итоге и определяют структурно-фазовую стабильность сплавов, а также характер высокотемпературного разупрочнения, и соответственно, жаропрочность при рабочих температурах, которые в настоящее время достигли значений, соответствующих температурному интервалу растворения основной упрочняющей  $\gamma'$ -фазы.

Учитывая высокие коэффициенты детерминированности и низкий уровень ошибки между расчетными и экспериментально установленными значениями температурных параметров можно сделать вывод о том, что полученные математические регрессионные зависимости являются адекватными и могут достаточно точно прогнозировать термодинамические параметры сплава в зависимости от его химического состава.

## Выводы

1. В литейных ЖНС значения температур ликвидус  $t_L$  и солидус  $t_S$  в первую очередь определяются суммарным содержанием  $\gamma$ -упрочнителей твердого раствора  $\Sigma\gamma$  с высокой температурой плавления. Чем больше величина  $\Sigma\gamma$ , тем выше значения температур  $t_L$  и  $t_S$ .

2. Для прогнозирования термодинамических параметров, а именно температур  $t_L$  и  $t_S$  полу-

чны универсальные математические регрессионные модели для широкого ряда литейных ЖНС, которые имеют вид аппроксимирующих прямых, описываемых уравнениями  $t_L = 5,552\Sigma\gamma + 1309,3$  с коэффициентом детерминированности  $R^2 = 0,9806$  и  $t_S = 8,7819\Sigma\gamma + 1189,6$  с  $R^2 = 0,9816$  соответственно.

3. В литейных ЖНС значения температур начала ( $t_{\text{пр}}^{\gamma'}$ ) и полного растворения ( $t_{\text{пр}}^{\gamma'}$ ) основной упрочняющей  $\gamma'$ -фазы, а также температуры плавления эвтектики  $\gamma$ - $\gamma'(t_{\text{эвт}})$ , в первую очередь зависят от суммарного содержания в составе сплава  $\gamma'$ -образующих элементов  $\Sigma\gamma'$ . Чем больше величина  $\Sigma\gamma'$ , тем выше значения температур  $t_{\text{пр}}^{\gamma'}$ ,  $t_{\text{пр}}^{\gamma'}$  и  $t_{\text{эвт}}$ .

4. Для прогнозирования температурных параметров  $t_{\text{пр}}^{\gamma'}$ ,  $t_{\text{пр}}^{\gamma'}$  и  $t_{\text{эвт}}$  получены универсальные математические регрессионные модели, апробированные для широкого ряда литейных ЖНС, которые имеют вид аппроксимирующих прямых:  $t_{\text{пр}}^{\gamma'} = 3,0087\Sigma\gamma' + 818,49$  с коэффициентом детерминированности  $R^2 = 0,9691$ ;  $t_{\text{пр}}^{\gamma'} = 25,073\Sigma\gamma' + 955,01$  с  $R^2 = 0,9715$ ;  $t_{\text{эвт}} = 16,059\Sigma\gamma' + 1101,8$  с  $R^2 = 0,9563$ .

1. Логунов А.В., Шмотин Ю.Н., Данилов Д.В. Методологические основы автоматизированного проектирования жаропрочных сплавов на никелевой основе. Ч. I // *Технология металлов*. — 2014. — № 5. — С. 3–9.
2. Логунов А.В., Шмотин Ю.Н., Данилов Д.В. Методологические основы автоматизированного проектирования жаропрочных сплавов на никелевой основе. Ч. II // *Там же*. — 2014. — № 6. — С. 3–10.
3. Логунов А.В., Шмотин Ю.Н., Данилов Д.В. Методологические основы автоматизированного проектирования жаропрочных сплавов на никелевой основе. Ч. III // *Там же*. — 2014. — № 7. — С. 3–11.
4. Кишкин С.Т., Строганов Г.Б., Логунов А.В. Литейные жаропрочные сплавы на никелевой основе. — М.: Машиностроение, 1987. — 116 с.
5. *Жаропрочность* литейных никелевых сплавов и защита их от окисления / Б.Е. Патон, Г.Б. Строганов, С.Т. Кишкин и др. — Киев: Наук. думка, 1987. — 256 с.
6. *Монокристаллы* никелевых жаропрочных сплавов / Р.Е. Шалин, И.Л. Светлов, Е.Б. Качанов и др. — М.: Машиностроение, 1997. — 336 с.
7. Каблов Е.Н., Голубовский Е.Р. Жаропрочность никелевых сплавов. — М.: Машиностроение, 1998. — 464 с.
8. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия). — М.: МИСИС, 2001. — 632 с.
9. Каблов Е.Н. Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина: науч.-техн. сб.: к 100-летию со дня рождения С.Т. Кишкина. — М.: Наука, 2006. — 272 с.
10. Каблов Е.Н. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007 / Юбилейный науч.-техн. сб. — М.: ВИАМ, 2007. — 439 с.
11. *Жаропрочные* сплавы для газовых турбин / Д. Котсорадис, П. Феликс, Х. Фишмайстер и др. — М.: Металлургия, 1981. — 480 с.
12. Симс Ч.Т., Столофф Н.С., Хагель У.К. Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и про-



- мышленных энергоустановок. В 2-х кн. — М.: Металлургия, 1995. — 384 с.
13. Морозова Г.И. Закономерность формирования химического состава  $\gamma'/\gamma$ -матрицы многокомпонентных никелевых сплавов // ДАН СССР. — 1991. — 320, № 6. — С. 1413–1416.
  14. Морозова Г.И., Тимофеева О.Б., Петрушин Н.В. Особенности структуры и фазового состава высокорениевого никелевого жаропрочного сплава // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2009. — № 2. — С. 10–16.
  15. Erickson G.L. The Development of the CMSX-11B and CMSX-11C Alloys for Industrial Gas Turbine Application // Superalloys. — 1996. — P. 45–62.
  16. 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.
  17. Жуков А.А., Смирнова О.А. Оценка эксплуатационной пригодности жаропрочных сплавов для ГТД и ГТУ // Авиационно-космическая техника и технология. — 2005. — № 10. — С. 60–66.
  18. Saunders N., Fahrman M., Small C.J. The Application of Calphad Calculations to Ni-Based Superalloys // Superalloys 2000. — TMS. — 2000. — P. 803–811.
  19. Saunders N. Phase Diagram Calculations for Ni-based Superalloys // Superalloys. — TMS. — 1996. — P. 101–110.
  20. Small C.J., Saunders N. The application of Calphad techniques in the development of a New gas-turbine disk alloy // Mat. Research Soc. Bull. — April. — 1999. — P. 22.
  21. Saunders N. Phase-Diagram Calculations for Ni-based Superalloys // Superalloys 1996 — TMS. — 1996. — P. 101–110.
  22. Беликов С.Б., Гайдук С.В., Кононов В.В. О влиянии тантала на характеристические точки жаропрочных никелевых сплавов // Вестник двигателестроения. — 2004. — № 3. — С. 99–102.
  23. Гайдук С.В. Особенности влияния тантала на структуру и свойства никелевых сплавов // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. — 2004. — № 1. — С. 16–19.
  24. Вертоградский В.А., Рыкова Т.П. Исследование фазовых превращений в сплавах типа ЖС методом ДТА // Жаропрочные и жаростойкие стали и сплавы на никелевой основе. — М.: Наука, 1984. — С. 223–227.
  25. Fippen J.S., Sparks P.B. Using differential thermal analysis to determine phase change temperatures // Metal Progr. — 1979. — № 4. — P. 56–59.

Experimental data of thermodynamic parameters of a number of domestic and foreign cast heat-resistant alloys of five generations were analyzed and processed. Designed were the mathematical regression models for prediction of calculations of thermodynamic parameters, which can be used in the development of new challenging alloys or updating of existing industrial alloys. Ref. 25, Tables 2, Figures 5.

**Key words:** cast heat-resistant alloys; alloying system; thermodynamic parameters; mathematical regression model

Поступила 21.10.2015

**Международная конференция**  
**«СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ»**  
13–15 июня 2016 г.  
Киев, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины

**Тематика конференции:**

- ◆ электронно-лучевая сварка
- ◆ лазерная сварка
- ◆ гибридные процессы сварки
- ◆ сварка трением с перемешиванием
- ◆ контактно-стыковая сварка высокопрочных сталей
- ◆ сварка дугой, вращающейся в магнитном поле
- ◆ 3D аддитивные технологии, базирующиеся на сварочных процессах

**Контрольные даты**

- ◆ Подача заявок для участия и отправка доклада до 15.03.2016
- ◆ Рассылка программы конференции до 15.04.2016
- ◆ Оплата организационного взноса до 14.06.2016

**Организационный комитет:**  
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины  
03680, г. Киев, ул. Боженко 11, тел./факс: +38(044) 200-82-77  
E-mail: journal@paton.kiev.ua, patonpublishinghouse@gmail.com  
www.pwi-scientists.com/rus/modernweld2016  
www.patonpublishinghouse.com