

Научная статья

УДК 669.018.44:669.245

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-13-26

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЛАВОВ ВЖМ1, ВЖМ4 И ВЖМ8

Д.А. Мовенко¹, Д.В. Зайцев¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Выполнено сравнительное исследование параметров решетки γ - и γ' -фаз, γ/γ' -мисфита, температуры γ' -сольвус, межфазной энергии на границе γ/γ' и энергии антифазной границы монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС) третьего, четвертого и пятого поколений. Основное внимание уделено зависимости этих характеристик от температуры и состава сплавов. Расчеты выполнены с использованием термодинамического моделирования. Установлено, что сплав ВЖМ8 характеризуется наиболее высокими значениями мисфита и температуры γ' -сольвус, сплав ВЖМ4 обладает наименьшей межфазной энергией на границе γ/γ' , сплав ВЖМ1 – самой высокой энергией антифазной границы.

Ключевые слова: жаропрочные никелевые сплавы, монокристаллы, параметры решетки, мисфит, температура сольвус, межфазная энергия, энергия антифазной границы

Для цитирования: Мовенко Д.А., Зайцев Д.В. Расчетная оценка структурно-фазовых и термодинамических характеристик сплавов ВЖМ1, ВЖМ4 и ВЖМ8 // Труды ВИАМ. 2026. № 2 (156). С. 13–26. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-13-26.

Scientific article

CALCULATED ESTIMATION OF THE STRUCTURAL-PHASE AND THERMODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE VZhM1, VZhM4 and VZhM8 ALLOYS

D.A. Movenko¹, D.V. Zaycev¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The article presents the results of a comparative study of the lattice parameters of the γ - and γ' -phases, the γ/γ' -misfit, γ' -solvus temperature, interfacial energy at the γ/γ' boundary and the antiphase boundary energy of single-crystal superalloys of the third to fifth generation. The focus was made on the dependence of these characteristics on the temperature and composition of the alloys. The calculations were carried out using thermodynamic modeling. It was found that the VZhM8 alloy has the highest values of misfit and γ' -solvus temperature; the VZhM4 alloy has the lowest interfacial energy at the γ/γ' boundary; the VZhM1 alloy has the highest antiphase boundary energy.

Ключевые слова: Ni-based superalloys, single crystals, lattice parameters, misfit, solvus temperature, interfacial energy, antiphase boundary energy

For citation: Movenko D.A., Zaycev D.V. Calculated estimation of the structural-phase and thermodynamic characteristics of the VZhM1, VZhM4 and VZhM8 alloys. *Trudy VIAM*, 2026, no. 2 (156), pp. 13–26. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-13-26.

Введение

Требования к прочности, сопротивлению высокотемпературной ползучести и термической стабильности монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС) непрерывно повышаются [1–5]. Механические свойства этих материалов напрямую зависят от структурно-фазовых и термодинамических характеристик.

Размерное несоответствие периодов кристаллических решеток γ' -фазы и равновесного с ней матричного γ -твердого раствора (γ/γ' -мисфит) [6–9] создает внутренние напряжения в материале, которые могут либо повышать сопротивление ползучести (при оптимальной величине мисфита), либо ускорять деградацию структуры (если мисфит слишком большой). Кроме того, мисфит оказывает влияние на когерентность γ - и γ' -фаз. Малый мисфит обеспечивает когерентное выделение частиц γ' -фазы, замедляя их укрупнение и повышая термическую стабильность. Важно также принимать во внимание не только величину γ/γ' -мисфита, но и его знак. В работе [10] показано, что наибольшую длительную прочность имеют сплавы с отрицательным ($a_\gamma > a_{\gamma'}$) γ/γ' -мисфитом, а наименьшую – сплавы с нулевым ($a_\gamma \approx a_{\gamma'}$) мисфитом.

Температура полного растворения γ' -фазы в γ -твердом растворе (γ' -сольвус) [11–14] является важной характеристикой термической стабильности ЖНС. Ниже этой температуры γ' -фаза стабильна, выше – сплав становится однофазным γ -твердым раствором. Частицы γ' -фазы – главный упрочняющий компонент ЖНС. Их устойчивость при высоких температурах обеспечивает жаропрочность и сопротивление ползучести. В связи с этим температура γ' -сольвус играет ключевую роль в термической обработке и эксплуатации сплавов. Повышение температуры γ' -сольвус позволит повысить рабочую температуру изделий из ЖНС.

Межфазная энергия на границе раздела γ/γ' [15–19] – это энергия, связанная с образованием поверхности между γ - и γ' -фазой. Она определяется взаимодействием атомов на границе раздела и играет ключевую роль в формировании микроструктуры, термической стабильности и механических свойств ЖНС. Зная величину межфазной энергии на границе γ/γ' , можно прогнозировать морфологию частиц γ' -фазы. Если энергия небольшая, частицы γ' -фазы растут более равномерно и имеют более однородный размер и форму, сдерживая дислокации и повышая прочность сплава. Большая энергия может привести к образованию крупных и неравномерно распределенных частиц и, следовательно, к дефектной структуре ЖНС.

Энергия антифазной границы (АФГ) [20–23] может оказывать влияние на механические свойства и стабильность микроструктуры ЖНС. Антифазные границы возникают в упорядоченной γ' -фазе, где нарушается периодичность расположения атомов. Энергия АФГ определяет, насколько легко дислокации могут пересекать эти границы. Высокая энергия АФГ затрудняет движение дислокаций и замедляет коалесценцию частиц γ' -фазы, сохраняя дисперсное упрочнение. Это приводит к стабилизации микроструктуры и повышению прочности и устойчивости к ползучести. Низкая энергия АФГ облегчает движение дислокаций, снижая прочность и ускоряя деградацию микроструктуры. Таким образом, определение энергии АФГ позволяет прогнозировать, как сплав будет сопротивляться деформации под нагрузкой, что критично для лопаток газовых турбин.

Экспериментальное измерение указанных ранее структурно-фазовых и термодинамических характеристик подразумевает использование множества методов исследования, таких как рентгеноструктурный анализ, дифференциальная сканирующая калориметрия, растровая и просвечивающая электронная микроскопия и другие. При этом возникают проблемы учета многомасштабных взаимодействий, влияния легирующих элементов и температурной зависимости. В связи с этим для оценки структурно-фазовых

и термодинамических характеристик удобно использовать термодинамическое моделирование. Результаты расчетов могут улучшить понимание связи между структурой и механическими свойствами материала, а также помочь в разработке рекомендаций по совершенствованию легирования и термической обработки ЖНС.

В работе проведена сравнительная оценка структурно-фазовых и термодинамических характеристик ЖНС третьего, четвертого и пятого поколений.

Материалы и методы исследования

Объект исследования – сплавы ВЖМ1 (III поколение), ВЖМ4 (IV поколение) и ВЖМ8 (V поколение) [24, 25]. Химический состав сплавов ВЖМ1, ВЖМ4 и ВЖМ8, использованный для расчетов, представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав ЖНС с монокристаллической структурой

Сплав	Содержание элементов, % (по массе)							
	Cr	Mo	W	Re	Ta	Al	Co	Ru
ВЖМ1 ¹	2,5	2,0	1,3	9,3	8,8	5,75	11,0	–
ВЖМ4 ²	2,7	4,0	4,0	6,0	4,5	6,0	6,0	4,0
ВЖМ8 ³	3,0	3,5	4,2	6,3	6,0	5,7	5,5	6,0

¹ Патент РФ № 2153021.
² Патент РФ № 2293782.
³ Патент РФ № 2402624.

Расчет структурно-фазовых и термодинамических характеристик проведен с помощью специализированного программного обеспечения, сочетающего термодинамические и кинетические модели с экспериментальными данными. Периоды решетки рассчитаны по модели, связывающей состав γ - и γ' -фаз, степень упорядочения (для γ' -фазы), температуру и молярный объем, γ/γ' -мисфит рассчитан как относительная разница в периодах решеток:

$$\Delta a = 2 \frac{(a_{\gamma'} - a_{\gamma})}{(a_{\gamma'} + a_{\gamma})} \cdot 100 \%,$$

где Δa – γ/γ' -мисфит; a_{γ} – период решетки γ -фазы; $a_{\gamma'}$ – период решетки γ' -фазы.

Температура γ' -сольвус рассчитана с использованием модели термодинамического равновесия и калориметрических данных. Межфазная энергия на границе γ/γ' и энергия АФГ рассчитаны для температуры 1200 °С с использованием кинетических моделей, учитывающих динамику межфазного взаимодействия. Величина энергии АФГ рассчитана при условии сдвига кристаллической решетки γ' -фазы на вектор $1/2 \langle 110 \rangle$. В этом случае антифазная граница разделяет две области кристалла, где атомы никеля и алюминия меняются местами на половину периода решетки.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты

На рис. 1 представлена расчетная оценка влияния температуры на величину периодов решетки γ - и γ' -фаз, а также γ/γ' -мисфита в сплавах ВЖМ1, ВЖМ4 и ВЖМ8. Видно, что с увеличением температуры величина периодов a_{γ} и $a_{\gamma'}$ возрастает.

Наибольшее значение a_γ имеет сплав ВЖМ8 (3,603265 Å при комнатной температуре и 3,667386 Å при 1200 °С), наименьшее – сплав ВЖМ1 (3,580713 Å при комнатной температуре и 3,647058 Å при 1200 °С), промежуточное – сплав ВЖМ4 (3,594427 Å при комнатной температуре и 3,658931 Å при 1200 °С). Кривые зависимости a_γ от температуры для сплавов ВЖМ1, ВЖМ4 и ВЖМ8 расположены параллельно друг другу и не пересекаются (рис. 1, а).

В то же время характер зависимости $a_{\gamma'}$ от температуры для сплавов ВЖМ1, ВЖМ4 и ВЖМ8 отличается. Видно, что до 600 °С наибольшее значение $a_{\gamma'}$ имеет сплав ВЖМ8 (3,593497 Å при комнатной температуре), наименьшее – сплав ВЖМ1 (3,583185 Å при комнатной температуре), промежуточное – сплав ВЖМ4 (3,587366 Å при комнатной температуре). После 600 °С величина $a_{\gamma'}$ в сплаве ВЖМ1 уже начинает превышать $a_{\gamma'}$ в сплаве ВЖМ4, а к 1200 °С – сравнивается по величине с $a_{\gamma'}$ в сплаве ВЖМ8 (рис. 1, б). Величина $a_{\gamma'}$ при 1200 °С составляет 3,652425 Å для сплава ВЖМ8; 3,648338 Å для сплава ВЖМ4 и 3,652080 Å для сплава ВЖМ1.

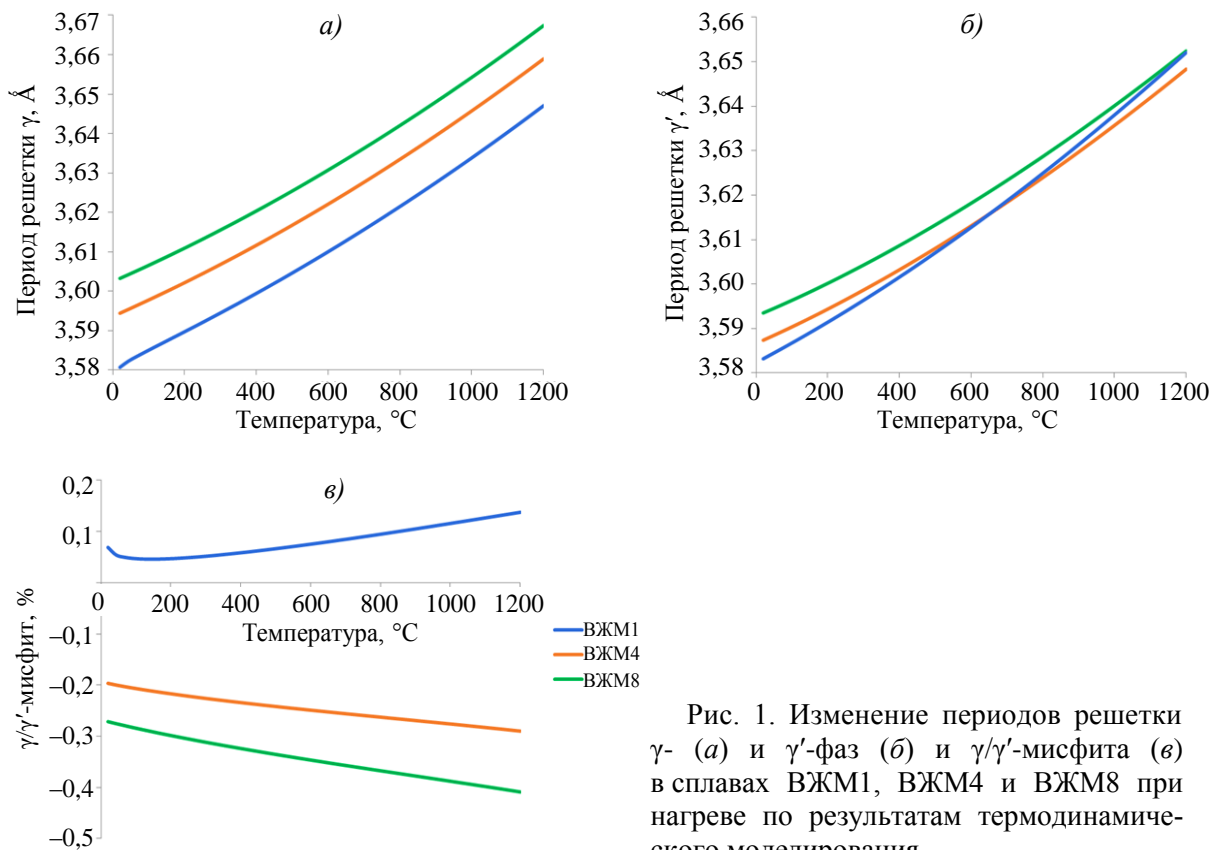


Рис. 1. Изменение периодов решетки γ - (а) и γ' -фаз (б) и γ/γ' -мисфита (в) в сплавах ВЖМ1, ВЖМ4 и ВЖМ8 при нагреве по результатам термодинамического моделирования

Наибольшая по модулю величина γ/γ' -мисфита обнаружена в сплаве ВЖМ8 и составляет $-0,27$ % при комнатной температуре, наименьшая – в сплаве ВЖМ1 (0,07 %), в сплаве ВЖМ4 γ/γ' -мисфит равен $-0,2$ %. В сплавах ВЖМ4 и ВЖМ8 мисфит отрицательный ($a_\gamma > a_{\gamma'}$), с повышением температуры величина мисфита увеличивается. В сплаве ВЖМ1 мисфит положительный ($a_\gamma < a_{\gamma'}$), с повышением температуры с 20 до 170 °С величина мисфита уменьшается, а со 170 до 1200 °С величина мисфита увеличивается. Величина γ/γ' -мисфита в сплавах ВЖМ1, ВЖМ4 и ВЖМ8 при 1200 °С составляет 0,14; $-0,29$ и $-0,41$ % соответственно (табл. 2).

Таблица 2

Результаты расчета структурно-фазовых и термодинамических характеристик сплавов ВЖМ1, ВЖМ4 и ВЖМ8

Сплав	γ/γ' -мисфит, %, при температуре, °С		Температура сольвус γ' -фазы, °С	Межфазная энергия γ/γ' мДж/м ² , при температуре 1200 °С	Энергия анти-фазной границы
	20	1200			
ВЖМ1	0,07	0,14	1299,3	37,1	238,9
ВЖМ4	-0,20	-0,29	1294,5	32,8	200,3
ВЖМ8	-0,27	-0,41	1322	37,7	203,6

На рис. 2 приведены результаты расчета влияния содержания легирующих элементов в сплавах ВЖМ1, ВЖМ4 и ВЖМ8 на температуру γ' -сольвус. Точками на кривых на рис. 2, 4, 5 обозначены фактические содержания элементов в соответствующих сплавах. Сплав ВЖМ8 имеет самую высокую температуру γ' -сольвус: 1322 °С. Сплавы ВЖМ1 и ВЖМ4 имеют близкие значения температуры γ' -сольвус: 1299,3 и 1294,5 °С соответственно (табл. 2). Из рис. 2 видно, что увеличение содержания рения повышает температуру γ' -сольвус. Увеличение содержания рутения до 6 % (здесь и далее – % по массе) в сплаве ВЖМ4 и до 7 % в сплаве ВЖМ8 повышает температуру γ' -сольвус, дальнейшее увеличение содержания рутения, наоборот, снижает температуру γ' -сольвус (рис. 2, б). Увеличение содержания тантала и вольфрама повышает температуру γ' -сольвус. При этом отмечено, что значение температуры γ' -сольвус выходит на плато при содержании тантала в сплавах ВЖМ4 и ВЖМ8 выше 6,5 % и при содержании вольфрама в сплаве ВЖМ8 – выше 5,5 % (рис. 2, в, г). Зависимость температуры γ' -сольвус от содержания молибдена также характеризуется нелинейностью. Температура γ' -сольвус растет при увеличении содержания молибдена до 7 % в сплаве ВЖМ1, до 8,5 % – в сплаве ВЖМ4 и до 4 % – в сплаве ВЖМ8. Дальнейшее увеличение содержания молибдена приводит к снижению температуры γ' -сольвус (рис. 2, д). Из рис. 2, е, ж видно, что хром и кобальт снижают температуру γ' -сольвус. Алюминий повышает температуру γ' -сольвус при увеличении его содержания до 6 %, дальнейшее увеличение содержания алюминия не влияет на величину температуры γ' -сольвус (рис. 2, з).

На рис. 3 представлены графики зависимости межфазной энергии на границе раздела γ/γ' (рис. 3, а) и энергии АФГ (рис. 3, б) от температуры. Видно, что при нагреве материала эти характеристики снижаются. Межфазная энергия γ/γ' в сплавах ВЖМ1 и ВЖМ8 при 1200 °С практически одинаковая: 37,1 и 37,7 мДж/м² соответственно, в сплаве ВЖМ4 межфазная энергия γ/γ' меньше и составляет 32,8 мДж/м². В целом – это близкие значения. Энергия АФГ в сплавах ВЖМ4 и ВЖМ8 при 1200 °С равна 200,3 и 203,6 мДж/м² соответственно, в сплаве ВЖМ1 энергия АФГ больше и равна 238,9 мДж/м² (табл. 2).

На рис. 4 показано влияние содержания легирующих элементов на величину межфазной энергии на границе раздела γ/γ' при 1200 °С. Для всех легирующих элементов зависимость прямо пропорциональная – с увеличением их содержания энергия растет.

На рис. 5 представлены зависимости величины энергии АФГ от содержания легирующих элементов при 1200 °С. Видно, что увеличение содержания рения, вольфрама, молибдена, хрома, алюминия снижает энергию АФГ. Изменение содержания тантала и кобальта практически не влияет на энергию АФГ. Рутений при содержании до 7 % в сплаве ВЖМ4 и 8 % в сплаве ВЖМ8 снижает энергию АФГ, а дальнейшее увеличение содержания рутения приводит к обратному эффекту – энергия АФГ увеличивается.

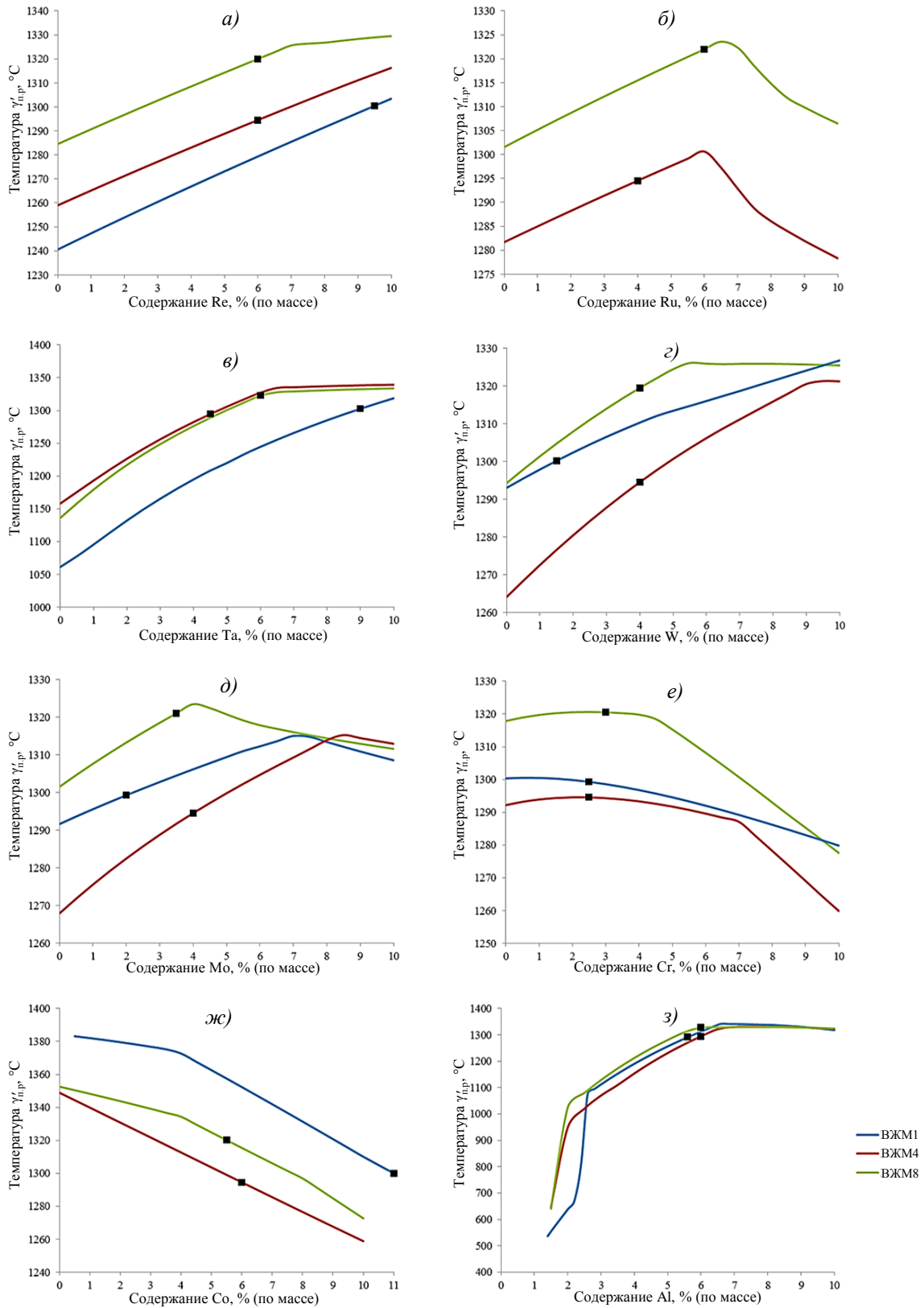


Рис. 2. Влияние массовой доли легирующих элементов на температуру γ' -солвус (температуру полного растворения γ' -фазы) в сплавах ВЖМ1, ВЖМ4 и ВЖМ8 по результатам термодинамического моделирования. Точками на кривых обозначены фактические содержания легирующих элементов в соответствующих сплавах

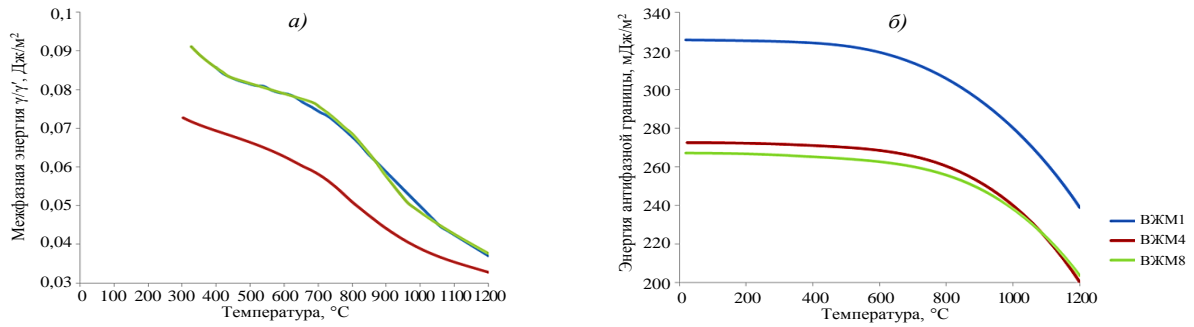


Рис. 3. Изменение межфазной энергии на границе раздела γ/γ' (а) и энергии антифазной границы в γ' -фазе (б) в сплавах ВЖМ1, ВЖМ4 и ВЖМ8 при нагреве по результатам термодинамического моделирования

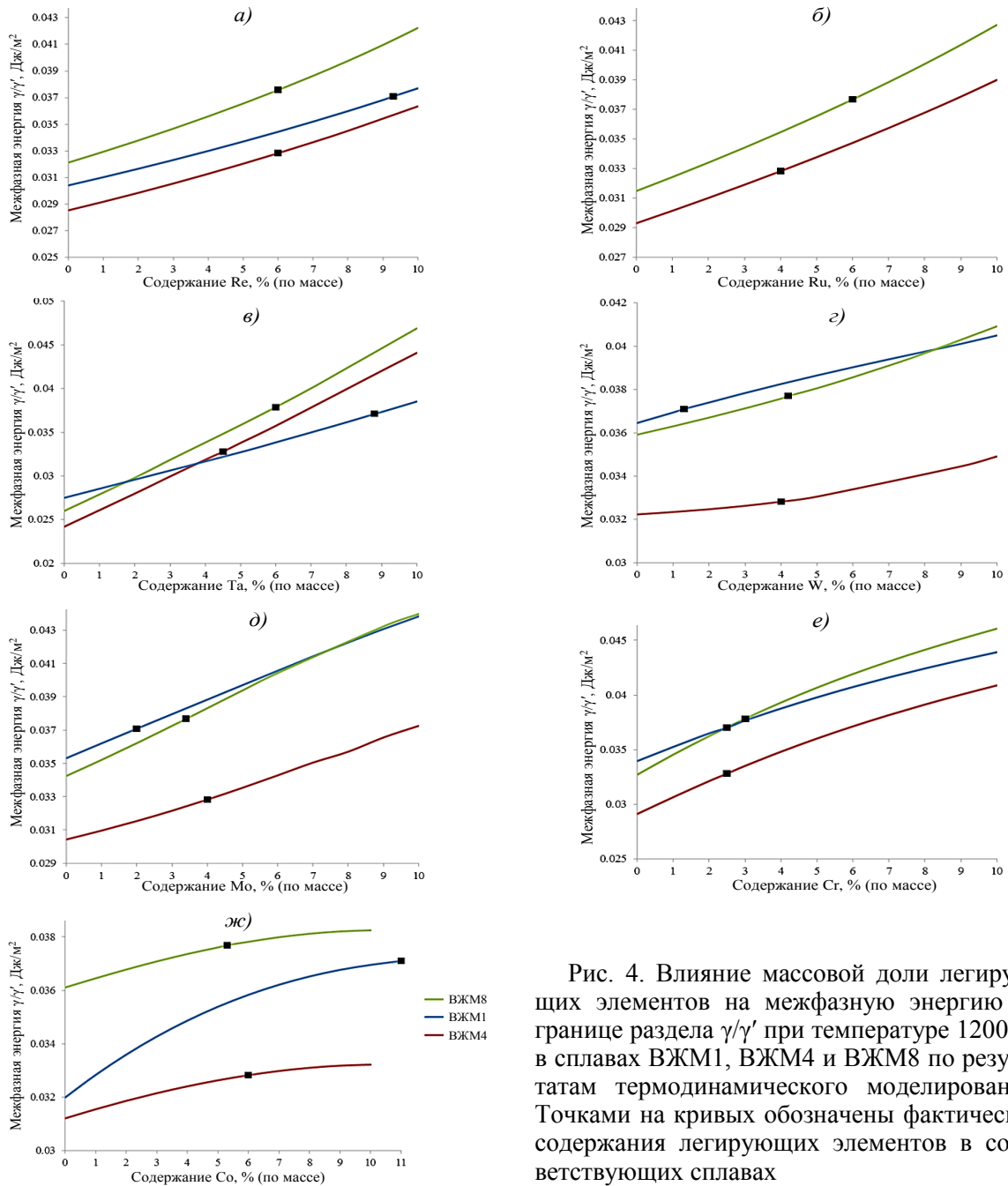


Рис. 4. Влияние массовой доли легирующих элементов на межфазную энергию на границе раздела γ/γ' при температуре 1200 °С в сплавах ВЖМ1, ВЖМ4 и ВЖМ8 по результатам термодинамического моделирования. Точками на кривых обозначены фактические содержания легирующих элементов в соответствующих сплавах

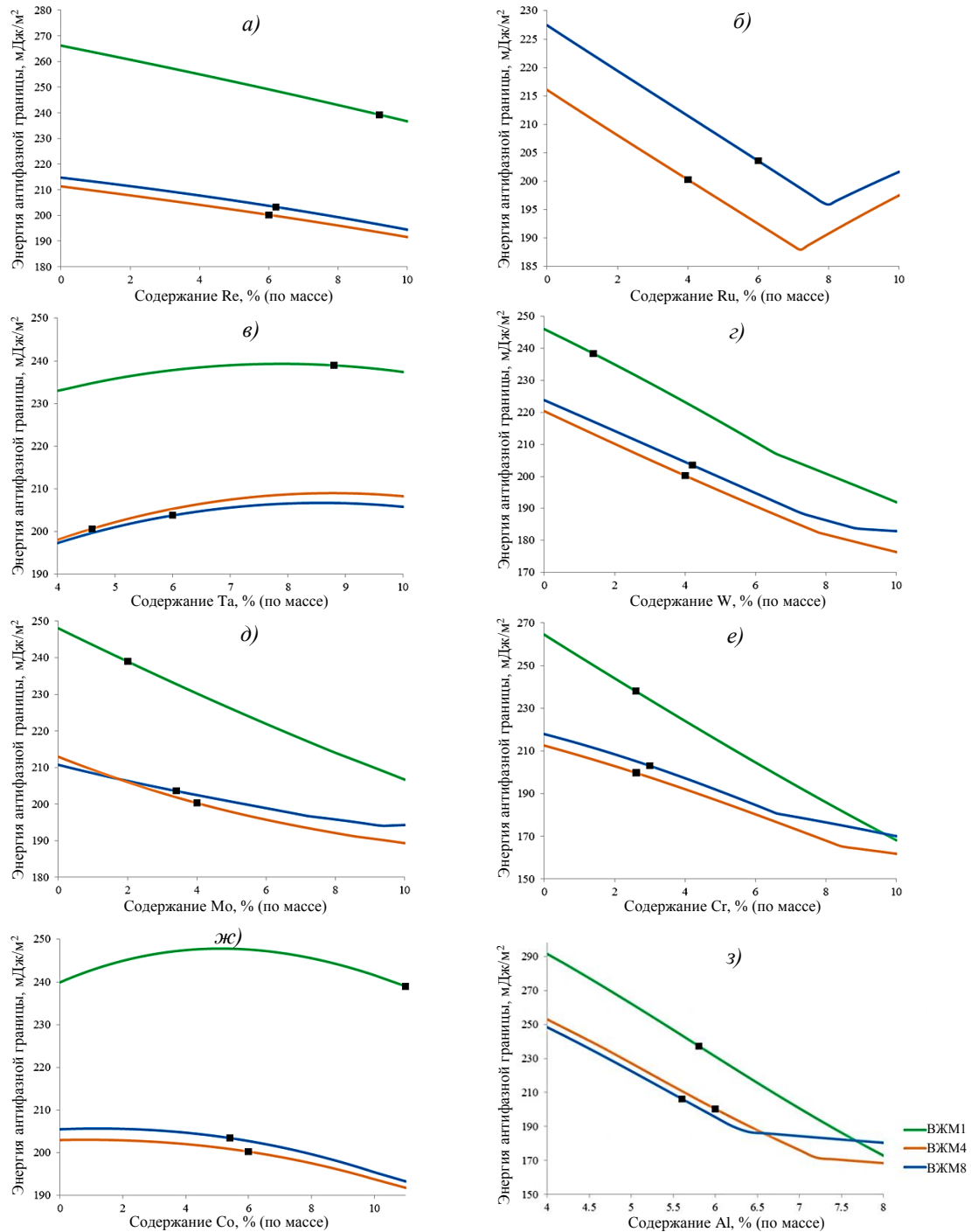


Рис. 5. Влияние массовой доли легирующих элементов на энергию антифазной границы в γ' -фазе при температуре 1200 °С в сплавах ВЖМ1, ВЖМ4 и ВЖМ8 по результатам термодинамического моделирования. Точками на кривых обозначены фактические содержания легирующих элементов в соответствующих сплавах

Обсуждение

Обнаружено, что периоды решетки γ - и γ' -фаз увеличиваются с повышением температуры. Это происходит по причине более интенсивного колебания атомов в кристаллической решетке при нагреве с последующим увеличением межатомных расстояний. Это явление характерно для всех материалов, включая ЖНС. Фазы γ и γ' имеют

разные коэффициенты линейного теплового расширения, но обе демонстрируют увеличение периода решетки с ростом температуры.

Самый малый период решетки γ -фазы обнаружен в сплаве ВЖМ1. Этот ЖНС содержит больше элементов с малым атомным радиусом, таких как кобальт и хром, которые незначительно увеличивают период решетки γ -фазы. Кроме того, в его составе отсутствует рутений, способствующий расширению решетки γ -фазы. В составе сплава ВЖМ4 содержится 4 % рутения и повышенная, по сравнению с ВЖМ1, массовая доля молибдена и вольфрама, которые обладают большим атомным радиусом и увеличивают период γ -фазы. В составе сплава ВЖМ8 содержится 6 % рутения, что делает период решетки γ -фазы самым большим из трех сплавов.

В сплавах ВЖМ4 и ВЖМ8 γ/γ' -мисфит отрицательный ($a_\gamma > a_{\gamma'}$), а в сплаве ВЖМ1 – положительный ($a_\gamma < a_{\gamma'}$). Вероятнее всего, это связано с отсутствием в составе сплава ВЖМ1 рутения. Важно отметить, что рутений может растворяться как в γ -фазе, так и в γ' -фазе, поэтому необходимо иметь представление об оптимальном содержании рутения.

Как известно, температура сольвус γ' -фазы зависит от ее термодинамической стабильности, которая определяется составом сплава. Согласно результатам расчета, наиболее высокая температура сольвус γ' -фазы в сплаве ВЖМ8: 1322 °С. Это можно объяснить высоким содержанием рутения (6 %), высоким содержанием вольфрама (4,2 %), усиливающего термостойкость, и оптимальным балансом молибдена (3,5 %) и тантала (6 %), что минимизирует образование вредных фаз. И, несмотря на то, что состав сплава ВЖМ4 схож с ВЖМ8, разницы в содержании рутения (4 %) и тантала (4,5 %) оказалось достаточно для того, чтобы температура сольвус γ' -фазы в нем имела наиболее низкое значение из всех исследуемых сплавов: 1294,5 °С. Этот факт подчеркивает важность оптимального баланса легирующих элементов ЖНС.

Из рис. 2 видно, что рений, тантал и вольфрам повышают температуру сольвус γ' -фазы. Эти элементы имеют большие атомные радиусы и высокие энергии активации диффузии. Повышение их содержания замедляет движение атомов в решетке, что затрудняет растворение частиц γ' -фазы при нагреве. Рений снижает коэффициент диффузии алюминия и никеля, сохраняя структуру γ' -фазы при высоких температурах. Тантал частично замещает алюминий в γ' -фазе, повышая ее термическую устойчивость. Кроме того, рений и тантал замедляют образование хрупких интерметаллидных фаз, таких как σ -фаза, которые конкурируют с γ' -фазой за легирующие элементы, особенно хром и молибден.

Кобальт и хром, наоборот, снижают температуру сольвус γ' -фазы. Эти элементы могут изменять свободную энергию Гиббса системы, смещая равновесие в сторону растворения γ' -фазы. Хром также может способствовать образованию карбидов и σ -фазы, которые связывают легирующие элементы (тантал, молибден), снижая их доступность для стабилизации γ' -фазы. Кобальт может увеличивать коэффициент диффузии алюминия в γ -фазе, ускоряя его переход из γ' -фазы в матрицу, что способствует растворению частиц γ' -фазы при нагреве.

Интерес представляет зависимость температуры сольвус γ' -фазы от содержания рутения. До определенной концентрации он повышает температуру сольвус γ' -фазы: 6 % для сплава ВЖМ4 и 7 % для сплава ВЖМ8. Дальнейшее увеличение содержания рутения снижает температуру сольвус γ' -фазы. Немонотонный характер зависимости может быть связан с несколькими факторами. Во-первых, избыточный рутений может замещать алюминий и тантал в γ' -фазе, снижая их эффективную концентрацию. Это уменьшает объемную долю γ' -фазы и снижает ее термодинамическую устойчивость, что приводит к снижению температуры сольвус. Во-вторых, при низких концентрациях

атомы рутения заполняют вакансии или компенсируют дефекты в γ' -фазе, укрепляя ее структуру. Но при высоком содержании рутения возникают значительные искажения кристаллической решетки, которые снижают стабильность упорядоченной структуры γ' -фазы, и температура сольвус уменьшается.

Расчитанные значения температуры сольвус γ' -фазы (табл. 2) можно использовать для контроля размера и распределения частиц γ' -фазы и, соответственно, для совершенствования режимов термообработки сплавов: проведение гомогенизации выше температуры сольвус с последующим старением ниже этой температуры.

На основании зависимостей на рис. 2 можно предложить рекомендации по повышению температуры сольвус γ' -фазы. В сплаве ВЖМ1 целесообразно увеличить содержание вольфрама и молибдена до верхнего предела паспортного интервала и снизить содержание кобальта до нижнего предела. В сплаве ВЖМ4 целесообразно увеличить содержание вольфрама, молибдена и рутения до верхнего предела паспортного интервала и снизить содержание кобальта до нижнего предела. В сплаве ВЖМ8 отмечен наиболее оптимальный для температуры сольвус γ' -фазы состав, можно рекомендовать лишь снизить содержание кобальта до нижнего предела.

Снижение межфазной энергии на границе раздела γ/γ' при нагреве (рис. 3, а) может быть связано с несколькими факторами. Во-первых, при повышении температуры увеличивается вклад энтропии в минимизацию свободной энергии Гиббса системы. Энтропия на границе раздела γ/γ' -фаз возрастает из-за усиления колебаний атомов, что снижает межфазную энергию. Во-вторых, повышение температуры ускоряет диффузионные процессы, позволяя атомам перераспределяться на границе раздела γ/γ' . Это способствует уменьшению количества дефектов и формированию более термодинамически стабильной структуры межфазной границы с меньшей энергией. Кривые для сплавов ВЖМ1 и ВЖМ8 на рис. 3 практически полностью накладываются друг на друга, а кривая для сплава ВЖМ4 проходит ниже. Это может быть связано с общим содержанием легирующих элементов и плотностью ЖНС. На рис. 4 показано, что увеличение содержания любого легирующего элемента повышает межфазную энергию на границе раздела γ/γ' . Общее содержание легирующих элементов в сплавах ВЖМ1 и ВЖМ8 имеет близкие значения: 40,65 и 40,2 % соответственно. Плотность этих сплавов равна 9,089 и 9,08 г/см³ соответственно. Общее содержание легирующих элементов и плотность сплава ВЖМ4 ниже: 37,2 % и 8,871 г/см³.

Интерес представляет характер зависимости энергии АФГ от температуры (рис. 3, б). Видно, что в интервале температур от комнатной до 650–850 °С (650 °С – для ВЖМ1, 800 °С – для ВЖМ4, 850 °С – для ВЖМ8) наблюдается незначительное снижение энергии АФГ. В интервале температур от 650–850 до 1200 °С снижение энергии АФГ происходит более интенсивно. Это можно объяснить тем, что область температур 650–850 °С является критичной для исследуемых сплавов: ниже этой области структура γ' -фазы остается упорядоченной, выше – начинается разупорядочение. Энергия АФГ напрямую зависит от степени упорядочения атомов в γ' -фазе, поэтому на графиках зависимостей (рис. 3, б) в интервале температур от 650–850 до 1200 °С наблюдается резкое снижение энергии АФГ.

Энергия АФГ в сплаве ВЖМ1 (238,9 мДж/м² при 1200 °С) выше, чем в сплавах ВЖМ4 (200,3 мДж/м² при 1200 °С) и ВЖМ8 (203,6 мДж/м² при 1200 °С). Это связано с отсутствием в составе сплава ВЖМ1 рутения, существенно снижающего энергию АФГ (рис. 5, б). И хотя в сплаве ВЖМ1 содержится 9,3 % рения, который также снижает энергию АФГ, вклад рутения все же больше. Из данных рис. 5 видно, что для повышения энергии АФГ следует снизить содержание вольфрама, молибдена, хрома и алюминия до нижнего предела паспортного интервала.

Выводы

1. Легирующие элементы влияют на термическую стабильность ЖНС:
 - рений, тантал и вольфрам повышают температуру γ' -сольвус вследствие замедления диффузии и стабилизации γ' -фазы;
 - рутений при содержании до 6–7 % увеличивает температуру γ' -сольвус, но при избытке снижает ее из-за влияния на состав и структуру γ' -фазы;
 - хром и кобальт снижают температуру γ' -сольвус, уменьшая растворимость алюминия и способствуя образованию вредных фаз.
2. Структурно-фазовые и термодинамические характеристики ЖНС III, IV и V поколений отличаются:
 - сплав ВЖМ8 демонстрирует наилучшие характеристики – максимальная температура γ' -сольвус (1322 °С), приемлемые значения межфазной энергии (37,7 мДж/м²) и энергии антифазной границы (203,6 мДж/м²), что обеспечивает высокую длительную прочность и сопротивление ползучести;
 - сплав ВЖМ1 уступает сплаву ВЖМ8 по всем параметрам из-за положительного мисфита и низкой температуры γ' -сольвус (1299,3 °С);
 - сплав ВЖМ4 находится по характеристикам между сплавами ВЖМ1 и ВЖМ8, но уступает сплаву ВЖМ8 пятого поколения из-за меньшего содержания рутения и тантала.
3. На основании результатов термодинамического моделирования можно рекомендовать следующее:
 - для повышения термической стабильности целесообразно увеличивать до верхнего предела паспортного интервала долю рения, вольфрама, тантала и снижать долю кобальта и хрома;
 - контроль содержания рутения критичен – увеличение его содержания при разработке ЖНС следующего поколения может привести к снижению температуры γ' -сольвус;
 - режимы термообработки следует проводить с учетом рассчитанных значений температуры γ' -сольвус с гомогенизацией выше температуры сольвус и последующим старением ниже температуры сольвус.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Мин П.Г. Металлургические основы обеспечения высокого качества монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 55–71. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-55-71.
2. Мовенко Д.А., Заводов А.В., Лаптев А.Б., Лощинина А.О. Изменение структуры сплава ВЖМ4-ВИ в процессе высокотемпературной солевой коррозии при 750 °С // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2024. № 5 (827). С. 22–29.
3. Мовенко Д.А., Шуртаков С.В. Причины образования микротрещин и снижение плотности их распределения в изделиях из никелевых жаропрочных сплавов, изготовленных методом СЛС (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 2 (67). С. 43–51. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 13.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-43-51.
4. Епишин А.И., Лисовенко Д.С. Определение изотермических постоянных упругости монокристаллического никелевого жаропрочного сплава в широком температурном интервале // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 2 (75). С. 122–136. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 13.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-122-136.
5. Мовенко Д.А., Лаптев А.Б., Загорских О.А. Исследование состава и морфологии продуктов горячей солевой коррозии жаропрочных никелевых сплавов // *Вопросы материаловедения*. 2021. № 1 (105). С. 107–115.

6. Тренинков И.А., Петрушин Н.В., Епишин А.И., Светлов И.Л., Нольце Г., Елютин Е.С. Экспериментальное определение температурной зависимости структурно-фазовых параметров никелевого жаропрочного сплава // *Материаловедение*. 2021. № 7. С. 3–12.
7. Епишин А.И., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Нольце Г. Модель для прогнозирования температурной зависимости γ/γ' амисфита в жаропрочных никелевых сплавах // *Материаловедение*. 2021. № 3. С. 9–18.
8. Chuang H., Liu L., Huang T. et al. The effects of misfit and diffusivity on γ' rafting in Re and Ru containing Nickel based single crystal super-alloys – details in thermodynamics and dynamics // *Vacuum*. 2021. Vol. 183. P. 1–9.
9. Goodfellow A., Owen L.R., Christofidou K.A. et al. The effect of temperature and Mo content on the lattice misfit of model Ni-based superalloys // *Metals*. 2019. Vol. 9. Is. 6. P. 1–9.
10. Петрушин Н.В., Епишин А.И., Светлов И.Л., Нольце Г., Елютин Е.С., Соловьев А.Е. Влияние знака γ/γ' -мисфита на структуру и длительную прочность монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов // *Материаловедение*. 2022. № 3. С. 17–26.
11. Ren Y., Hu T., Xu S. et al. Rapid estimation of γ' solvus temperature for composition design of Ni-based superalloy via physics-informed generative artificial intelligence // *Journal of alloys and metallurgical systems*. 2024. Vol. 6. ID: 100073.
12. Horst O.M., Schmitz D., Schreuer J. et al. Thermoelastic properties and γ' -solvus temperature of single-crystal Ni-base superalloys // *Journal of Materials Science*. 2021. Vol. 56. P. 7637–7658.
13. Wang C., Chen X., Chen Y. et al. Accelerated design of high γ' solvus temperature and yield strength cobalt-based superalloy based on machine learning and phase diagram // *Frontiers in Materials*. 2022. Vol. 9. ID: 882955.
14. Caron P. High γ' solvus new generation nickel-based superalloys for single crystal turbine blade applications // *Superalloys 2000*. TMS, 2000. P. 737–746.
15. Liang S.X., Liu K.Y., Zhou Y.X. et al. Interfacial energy between γ/γ' phases of Ni-Al alloys extracted by using a new method // *Materials Chemistry and Physics*. 2022. Vol. 277. ID: 125538.
16. Ardell A.J. Temperature dependence of the γ/γ' interfacial energy in binary Ni-Al alloys // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2021. Vol. 52. P. 5182–5199.
17. Zhuang X., Antonov S., Li L., Feng Q. Effect of alloying elements on the coarsening rate of γ' precipitates in multi-component CoNi-based superalloys with high Cr content // *Scripta Materialia*. 2021. Vol. 202. ID: 114004.
18. Kar S., Bagui S., Mahato B. et al. Coarsening behavior of γ' precipitates in high Fe containing Ni-Fe-Cr-based medium entropy alloy // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2024. Vol. 55. P. 2609–2615.
19. Zhang J., Huang T., Lu F. et al. The effect of rhenium on the microstructure stability and γ/γ' interfacial characteristics of Ni-based single crystal superalloys during long-term aging // *Journal of alloys and compounds*. 2021. Vol. 876. ID: 160114.
20. Dodaran M., Hemmasian Etefagh A., Guo S.M. et al. Effect of alloying elements on the γ' anti-phase boundary energy in Ni-base super-alloys // *Intermetallics*. 2020. No. 117. ID: 106670.
21. Vamsi K.V., Karthikeyan S. Modeling APB energies in multicomponent Ni-base superalloys // *Intermetallics*. 2021. No. 132. ID: 107124.
22. Chen E., Tamm A., Wang T. et al. Modeling antiphase boundary energies of Ni₃Al-based alloys using automated density functional theory and machine learning // *Computational Materials*. 2022. Vol. 8. Is. 1. ID: 80.
23. Chen Y., Han J., Yang C. et al. Coupling effect of Ni and Ta on the antiphase boundary energy in γ' phase of CoNi-based superalloys // *Materials Today Communications*. 2025. Vol. 46. ID: 112600.
24. Светлов И.Л., Петрушин Н.В., Епишин А.И., Карашаев М.М., Елютин Е.С. Монокристаллы жаропрочных никелевых сплавов, легированных рением и рутением (обзор). Часть 1 // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 1 (70). С. 30–50. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 13.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-30-50.

25. Светлов И.Л., Петрушин Н.В., Епишин А.И., Карашаев М.М., Елютин Е.С. Монокристаллы жаропрочных никелевых сплавов, легированных рением и рутением (обзор). Часть 2 // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). С. 3–22. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 13.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-3-22.

References

1. Kablov E.N., Sidorov V.V., Kablov D.E., Min P.G. The metallurgical fundamentals for high quality maintenance of single crystal heat-resistant nickel alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 55–71. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-55-71.
2. Movenko D.A., Zavodov A.V., Laptev A.B., Loshchinina A.O. Changes in the structure of the VZhM4-VI alloy during high-temperature salt corrosion at 750 °C. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2024, no. 5 (827), pp. 22–29.
3. Movenko D.A., Shurtakov S.V. Microcrack formation and controlling in nickel superalloys processed by selective laser melting (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 13, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-43-51.
4. Epishin A.I., Lisovenko D.S. Determination of isothermal elasticity constants of a single-crystal nickel-based superalloy in a wide temperature range. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), pp. 122–136. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 13, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-122-136.
5. Movenko D.A., Laptev A.B., Zagorskikh O.A. Study of the composition and morphology of hot salt corrosion products of heat-resistant nickel alloys. *Voprosy materialovedeniya*, 2021, no. 1 (105), pp. 107–115.
6. Treninkov I.A., Petrushin N.V., Epishin A.I., Svetlov I.L., Nolze G., Elyutin E.S. Experimental determination of the temperature dependence of the structural-phase parameters of a nickel heat-resistant alloy. *Materialovedenie*, 2021, no. 7, pp. 3–12.
7. Epishin A.I., Petrushin N.V., Svetlov I.L., Nolze G. Model for predicting the temperature dependence of γ/γ' misfit in heat-resistant nickel alloys. *Materialovedenie*, 2021, no. 3, pp. 9–18.
8. Chuang H., Liu L., Huang T. et al. The effects of misfit and diffusivity on γ' rafting in Re and Ru containing Nickel based single crystal super-alloys – details in thermodynamics and dynamics. *Vacuum*, 2021, vol. 183, pp. 1–9.
9. Goodfellow A., Owen L.R., Christofidou K.A. et al. The effect of temperature and Mo content on the lattice misfit of model Ni-based superalloys. *Metals*, 2019, vol. 9, is. 6, pp. 1–9.
10. Petrushin N.V., Epishin A.I., Svetlov I.L., Nolze G., Elyutin E.S., Soloviev A.E. Influence of the sign of γ/γ' misfit on the structure and long-term strength of single crystals of nickel-based heat-resistant alloys. *Materialovedenie*, 2022, no. 3, pp. 17–26.
11. Ren Y., Hu T., Xu S. et al. Rapid estimation of γ' solvus temperature for composition design of Ni-based superalloy via physics-informed generative artificial intelligence. *Journal of alloys and metallurgical systems*, 2024, vol. 6, ID: 100073.
12. Horst O.M., Schmitz D., Schreuer J. et al. Thermoelastic properties and γ' -solvus temperature of single-crystal Ni-base superalloys. *Journal of Materials Science*, 2021, vol. 56, pp. 7637–7658.
13. Wang C., Chen X., Chen Y. et al. Accelerated design of high γ' solvus temperature and yield strength cobalt-based superalloy based on machine learning and phase diagram. *Frontiers in Materials*, 2022, vol. 9, ID: 882955.
14. Caron P. High γ' solvus new generation nickel-based superalloys for single crystal turbine blade applications. *Superalloys 2000*. TMS, 2000, pp. 737–746.
15. Liang S.X., Liu K.Y., Zhou Y.X. et al. Interfacial energy between γ/γ' phases of Ni-Al alloys extracted by using a new method. *Materials Chemistry and Physics*, 2022, vol. 277, ID: 125538.
16. Ardell A.J. Temperature dependence of the γ/γ' interfacial energy in binary Ni-Al alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2021, vol. 52, pp. 5182–5199.
17. Zhuang X., Antonov S., Li L., Feng Q. Effect of alloying elements on the coarsening rate of γ' precipitates in multi-component CoNi-based superalloys with high Cr content. *Scripta Materialia*, 2021, vol. 202, ID: 114004.

18. Kar S., Bagui S., Mahato B. et al. Coarsening behavior of γ' precipitates in high Fe containing Ni-Fe-Cr-based medium entropy alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2024, vol. 55, pp. 2609–2615.
19. Zhang J., Huang T., Lu F. et al. The effect of rhenium on the microstructure stability and γ/γ' interfacial characteristics of Ni-based single crystal superalloys during long-term aging. *Journal of alloys and compounds*, 2021, vol. 876, ID: 160114.
20. Dodaran M., Hemmasian Etefagh A., Guo S.M. et al. Effect of alloying elements on the γ' antiphase boundary energy in Ni-base super-alloys. *Intermetallics*, 2020, no. 117, ID: 106670.
21. Vamsi K.V., Karthikeyan S. Modeling APB energies in multicomponent Ni-base superalloys. *Intermetallics*, 2021, no. 132, ID: 107124.
22. Chen E., Tamm A., Wang T. et al. Modeling antiphase boundary energies of Ni₃Al-based alloys using automated density functional theory and machine learning. *Computational Materials*, 2022, vol. 8, is. 1, ID: 80.
23. Chen Y., Han J., Yang C. et al. Coupling effect of Ni and Ta on the antiphase boundary energy in γ' phase of CoNi-based superalloys. *Materials Today Communications*, 2025, vol. 46, ID: 112600.
24. Svetlov I.L., Petrushin N.V., Epishin A.I., Karashaev M.M., Elyutin E.S. Single crystals of nickel-based superalloys alloyed with rhenium and ruthenium (review). Part 1. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), pp. 30–50. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 13, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-30-50.
25. Svetlov I.L., Petrushin N.V., Epishin A.I., Karashaev M.M., Elyutin E.S. Single crystals of nickel-based superalloys alloyed with rhenium and ruthenium (review). Part 2. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), pp. 3–22. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 13, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-3-22.

Информация об авторах

Мовенко Дмитрий Александрович, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Зайцев Денис Владимирович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Dmitriy A. Movenko, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Denis V. Zaycev, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 18.06.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 01.07.2025.
The article was submitted 18.06.2025; approved and accepted for publication after reviewing 01.07.2025.