



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-1-25-31>
УДК 621.74

Поступила 18.01.2022
Received 18.01.2022

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЛИТЕЙНЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ – ОСНОВА ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ЛИТЕЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Т. А. РАД, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия, ул. Политехническая, 29. E-mail: radgl@yandex.ru
М. В. ИКСАНОВ, Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов
«Прометей» Национального научно-исследовательского центра «Курчатовский институт»,
г. Санкт-Петербург, Россия, ул. Шпалерная, 49. E-mail: IksanovMV89@yandex.ru
В. М. ГОЛОД, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия, ул. Политехническая, 29. E-mail: lpi2015@mail.ru
Ю. Ю. МАЛИНКИНА, Центральный научно-исследовательский институт конструкционных мате-
риалов «Прометей» Национального научно-исследовательского центра «Курчатовский институт»,
г. Санкт-Петербург, Россия, ул. Шпалерная, 49. E-mail: yuliya_malinkina@mail.ru

В работе обоснована необходимость системного формирования интеллектуальных связей для интеграции в единый комплекс ныне разрозненных программных продуктов по технологическому анализу геометрии отливок, термодинамическому моделированию свойств титановых сплавов, расчету теплофизических характеристик формовочных смесей с целью сопряженной реализации совокупности моделирующих процедур и диагностики литейных процессов. При отсутствии подобного интегрированного программного комплекса компьютерный анализ результатов моделирования при существующей практике изготовления изделий демонстрирует (на примере распределения усадочных дефектов в ответственной отливке из сплава ТЛЗ) необходимость радикального совершенствования средств технологического проектирования.

Одним из узловых компонентов формируемой в перспективе «цифровой технологии» является термодинамическое моделирование равновесных фазовых превращений, позволяющее рассчитывать показатели физико-химических, термодинамических, теплофизических и литейных параметров титановых сплавов и их эволюцию в температурном интервале кристаллизации. На основе термодинамического моделирования, аппарата планирования экспериментов и опыта проведенного статистического анализа разработана методика формирования моделей для оценки равновесных параметров, используемых при моделировании литейных процессов, и показана возможность ее применения к различным литейным титановым сплавам. Для нормативной композиции сплава ТЛЗ получена многофакторная система уравнений, отражающая степень влияния компонентов на колебания комплекса характеристик сплава, определяющих развитие ряда литейных дефектов. Описаны возможности использования полученных моделей для сплава ТЛЗ и методики их получения для применения в системах компьютерного моделирования с целью повышения адекватности и точности получаемых результатов.

Ключевые слова. Титановые сплавы, термодинамическое моделирование, математическая статистика, физико-химические и теплофизические свойства, цифровые технологии, комплексное программное обеспечение.

Для цитирования. Рад, Т. А. Термодинамический анализ литейных титановых сплавов – основа информационного обеспечения при разработке оптимальной литейной технологии / Т. А. Рад, М. В. Иксанов, В. М. Голод, Ю. Ю. Малинкина // Литье и металлургия. 2022. № 1. С. 25-31. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-1-25-31>.

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF CASTING TITANIUM ALLOYS IS THE BASIS OF INFORMATION SUPPORT IN THE OPTIMAL FOUNDRY TECHNOLOGY DEVELOPMENT

T. A. RAD, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia, 29, Politechnicheskaya str. E-mail: radgl@yandex.ru
M. V. IKSANOV, NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”,
St. Petersburg, Russia, 49, Shpalernaya str. E-mail: IksanovMV89@yandex.ru
V. M. GOLOD, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia, 29, Politechnicheskaya str. E-mail: lpi2015@mail.ru
Yu. Yu. MALINKINA, NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”,
St. Petersburg, Russia, 49, Shpalernaya str. E-mail: yuliya_malinkina@mail.ru

The necessity of systematic formation of intellectual connections for integration into a single complex of currently fragmented software products for the technological analysis of the castings geometry, thermodynamic modeling of the titanium alloys properties, calculation of molding mixtures thermophysical characteristics for the purpose of conjugate implementation of a set of modeling procedures and casting processes diagnostics of is proved. Lack of such an integrated software package, computer analysis of modeling results in the existing manufacturing products practice demonstrates (by the example of the shrinkage defects distribution in a responsible casting of TL3 alloy) the need for radical technological design tools' improvement.

One of the key components of the "digital technology" being formed in the future is thermodynamic modeling of equilibrium phase transformations, which allows calculating the physico-chemical parameters, thermodynamic, thermophysical and casting parameters of titanium alloys and their evolution in the temperature range of crystallization. Based on thermodynamic simulation, experimental planning apparatus and the experience of statistical analysis carried out, a method for forming models for estimating equilibrium parameters used in modeling foundry processes has been developed, and it shows the possibility of applying it to various casting titanium alloys. For the standard composition of the TL3 alloy, a multifactor system of equations was obtained, reflecting the degree of influence of the components on the fluctuations of the alloy characteristics complex, which determine the development of a series of casting defects. The possibilities of using the obtained models for TL3 alloy and methods of obtaining them for use in computer modeling systems to increase the adequacy and accuracy of the results obtained are described.

Keywords. Titanium alloys, thermodynamic modeling, mathematical statistics, physico-chemical and thermophysical properties, digital technologies, integrated software.

For citation. Rad T. A., Iksanov M. V., Golod V. M., Malinkina Yu. Yu. Thermodynamic analysis of casting titanium alloys is the basis of information support in the optimal foundry technology development. *Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 1, pp. 25–31. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-1-25-31>.

Титан и сплавы на его основе широко применяются в качестве конструкционных материалов в изделиях судостроительной, машиностроительной, химической и других отраслях промышленности благодаря уникальному комплексу характеристик, востребованных в этих областях применения (высокая удельная прочность и коррозионная стойкость, немагнитность и др.). При производстве деталей ответственного назначения, отличающихся сложной конфигурацией и высокой стоимостью заготовок из титановых сплавов, оптимальным методом их изготовления является литье [1–3], что позволяет значительно повысить коэффициент использования металла по сравнению с коваными изделиями и за счет уменьшения объема механической обработки и сварочных операций в итоге понизить затраты материальных и временных ресурсов.

Прогрессивно растущие требования к техническим характеристикам изделий ответственного назначения требуют эквивалентного повышения качества отливок и роста оперативности литейного производства по освоению новой и/или корректировки технологических процессов для действующей номенклатуры. В настоящее время при производстве титановых отливок инженеры-технологи в ходе разработки литейной технологии, как правило, опираются на полученные для ряда стандартизированных отливок нормативные показатели, расчетные диаграммы и аналитические формулы, которые не могут с требуемой надежностью служить в качестве достоверного руководства по проектированию оптимальных литниково-питающих систем, обеспечивающих получение отливок с минимальным количеством дефектов. Необходимый значительный прогресс в производстве качественных отливок может и должен быть достигнут за счет внедрения в технологическую практику так называемых *цифровых технологий*, представляющих систему взаимосвязанных этапов компьютерного моделирования, прогнозирования и оптимизации литейных процессов, оперативно адаптируемых к существующим и изменяющимся условиям производства. Основой для поиска соответствующих перспективных решений являются современные системы компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП), требующие радикального обновления их математического аппарата и информационного обеспечения и совершенствования качества выполнения принимаемых на себя функций.

Для качественного моделирования литейных процессов требуется информационное обеспечение применяемых СКМ ЛП набором адекватных исходных данных, в первую очередь, в части температурно-зависимых теплофизических характеристик литейных сплавов и формовочных материалов [4, 5]. Определение теплофизических и физико-химических характеристик сплавов возможно на основе термодинамического моделирования структурно-фазовых превращений при затвердевании и охлаждении отливки в форме с учетом реальной степени неравновесности процесса кристаллизации. Для формовочных материалов требуется определение их локальных теплофизических характеристик в производственных условиях с целью обеспечения адекватности компьютерного моделирования.

В отечественной и зарубежной литературе данные по температурно-зависимым характеристикам литейных титановых сплавов бессистемны, что связано с их высокой реактивной способностью и сложностью проведения высокотемпературных производственных экспериментов. Это в полной мере относится

и к теплофизическим характеристикам, применяемым при производстве титановых отливок, и к формовочным материалам – периклазовым жидкостекольным смесям. Сложность информационного обеспечения для компьютерного анализа формирования отливок из титановых сплавов в значительной степени объясняет возможное несоответствие результатов моделирования и данных рентгеновского контроля реальных отливок.

На рис. 1, *а* представлено фото вскрытых для заварки дефектов в отливке ответственного назначения «Корпус передний» массой 900 кг из сплава ТЛЗ, изготовленной по существующей производственной технологии, в сопоставлении с распределением усадочных дефектов, выявленных с помощью программного комплекса POLYCAST при моделировании условий затвердевания (рис. 1, *б*) и питания (рис. 1, *в*) отливки с целью объемной диагностики причин и локализации раковин и пористости.

Отсутствие многофакторного и непрерывного контроля параметров выплавки или неполнота реальной информации по химическому составу титановых сплавов, включая полный перечень их контролируемых примесей, в сочетании с несовершенной оценкой значений физико-химических и теплофизических характеристик заливаемых сплавов и фактических свойств формовочных смесей формируют закономерные предпосылки для возникновения литейных дефектов и необходимость радикального совершенствования средств технологического проектирования.

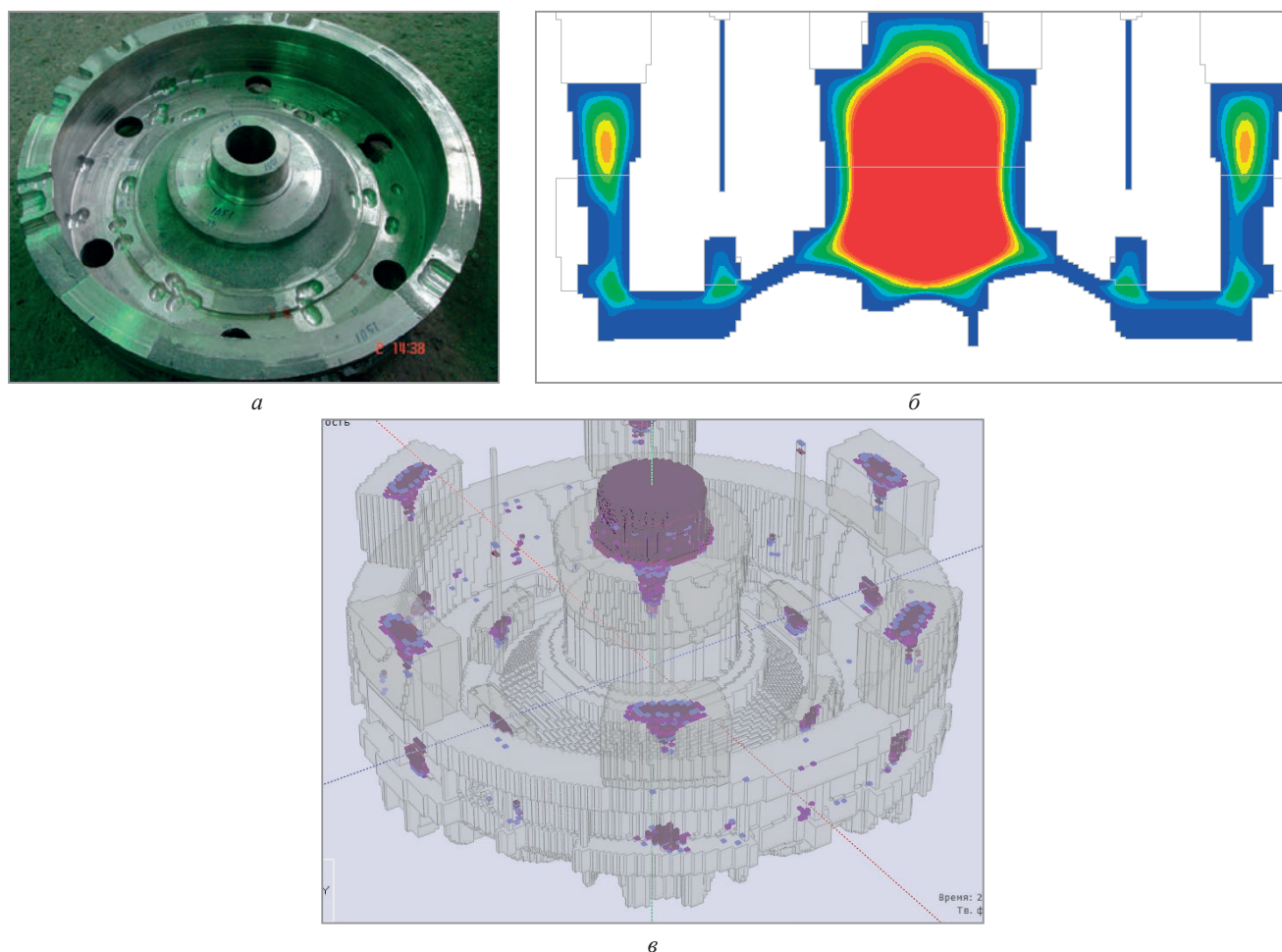


Рис. 1. Локализация усадочных пустот в отливке массой 900 кг (*а*) в сопоставлении с расчетным распределением продолжительности затвердевания в осевом сечении (*б*) и объемной локализацией усадочных дефектов (*в*), полученных на основе компьютерного моделирования с использованием программного комплекса POLYCAST

Рассматриваемый в работе литейный титановый сплав ТЛЗ относится к классу α -сплавов, практически не имеющих в своем составе β -фазы. Химический состав отливок (согласно нормативной документации) должен отвечать требованиям, приведенным в табл. 1.

Алюминий является единственным легирующим элементом в сплаве ТЛЗ и его содержание может изменяться в пределах 1,5%. Содержание контролируемых примесей ограничено с целью обеспечения свариваемости сплава и предупреждения образования соединений титана с С, О, N и H, которые существенно понижают его пластические свойства.

Таблица 1. Химический состав сплава ТЛЗ

Содержание компонентов, %						
Легирующие элементы	Примеси, не более					
Al	Fe	Si	C	O	N	H
3,0–4,5	0,25	0,15	0,15	0,15	0,04	0,008

Для количественного учета реальных колебаний химического состава сплава, присущих производству отливок при неизменной технологии и поставках исходных материалов (расходуемых электродов), был проведен статистический анализ результатов цехового контроля химического состава в отливках. Объем выборки составил 848 плавов за период с 2014 по 2016 г.

Таблица 2. Результаты статистического анализа химического состава производственных отливок из сплава ТЛЗ

Компонент сплава	Пределы по нормативной документации (НД)	Цеховые данные			Результаты статистического анализа		
		C_{\min}	$C_{\text{ср}}$	C_{\max}	$\pm\sigma$	$C_{\text{ср}}-3\sigma$	$C_{\text{ср}}+3\sigma$
		Химический состав, %					
Al	3,0–4,5	3,02	3,73	4,44	0,18	3,19	4,27
Fe	$\leq 0,25$	0,05	0,07	0,17	0,02	0,01	0,13
Si	$\leq 0,15$	0,010	0,015	0,030	0,006	0,000	0,034
C	$\leq 0,12$	0,02	0,03	0,11	0,01	0,00	0,06
O	$\leq 0,15$	0,050	0,100	0,150	0,024	0,028	0,172
H	$\leq 0,008$	0,0012	0,0038	0,0048	0,0004	0,0026	0,005
N	$\leq 0,04$	0,006	0,015	0,040	0,007	0,000	0,036

Примечание: C_{\min} , $C_{\text{ср}}$, C_{\max} – минимальное, среднее и максимальное содержание компонентов; $C_{\text{ср}}-3\sigma$, $C_{\text{ср}}+3\sigma$ – нижний и верхний пределы содержания компонентов; $\pm\sigma$ – среднеквадратичное отклонение.

По результатам анализа (табл. 2) можно сделать вывод, что все анализируемые плавки соответствуют требованиям отраслевого стандарта, следовательно, при статистическом анализе ожидать выпадов по химическому составу при сохранении существующих условий производства в будущем нет оснований. Верхняя статистическая граница максимального содержания кислорода ($C_{\text{ср}}+3\sigma$), отвечающего вероятности 99,7%, выходит за пределы допустимого, что является основанием для изучения причин повышенного уровня содержания кислорода в отливках.

Наряду со статистическим анализом были построены гистограммы распределения компонентов (рис. 2), позволяющие детально оценить различный характер изменения частоты содержания элементов в исследуемом интервале относительно расположения локальных максимумов, асимметрию выявленного распределения и вероятность возникновения выпадов. На основании данных статистического анализа и представленных графиков можно заключить, что изменение содержания большинства элементов происходит практически во всем допустимом диапазоне требований нормативной документации за исключением железа, кремния и водорода. Средние значения содержания ряда компонентов (например, для C и N) существенно смещены к нижней границе допустимых интервалов, что свидетельствует об их низком содержании в шихтовых материалах и отсутствии неблагоприятного прироста в процессе переплава. Гистограмма распределения содержания углерода (рис. 2, в) наглядно указывает на неоднократное проявление в производстве некоторого количества повышенных результатов измерений, значительно

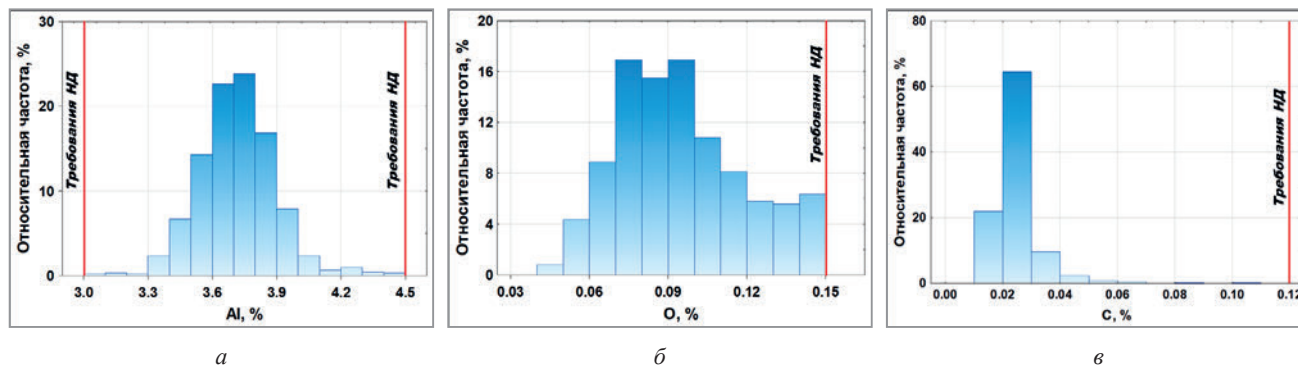


Рис. 2. Гистограммы распределения содержания алюминия (а), кислорода (б) и углерода (в) в отливках

отличающихся от основной группы анализов и не оказывающих заметного влияния на среднее значение, что искажает статистическую оценку верхней границы разброса. Эти факты требуют отдельного анализа с целью определения причин их появления при вероятном нарушении технологического процесса или использовании некачественных шихтовых материалов.

Результаты проведенного статистического анализа данных цехового контроля химического состава отливок (табл. 2) и оценка гистограмм распределения содержания элементов (рис. 2) были использованы для определения граничных значений содержания каждого компонента при последующем проведении термодинамического анализа (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Состав сплава ТЛЗ, принятый для статистического моделирования

Al,%	N,%	O,%	Fe,%	H,%	C,%	Si,%
3,75–4,50	0,023–0,040	0,10–0,15	0,15–0,25	0,005–0,008	0,085–0,150	0,065–0,12

В работе использован программный комплекс термодинамического моделирования POLYTHERM-Ti (разработка СПб ПУ Петра Великого), в котором реализован расчет свободной энергии Гиббса сплава на основе его представления как субрегулярного раствора, что позволяет оценить параметры физико-химического взаимодействия компонентов и характеристики титановых сплавов в широком интервале температур [6].

При термодинамическом анализе с помощью программного комплекса POLYTHERM-Ti определен набор базовых физико-химических (t_L , t_S , ρ_L , ρ_S) и теплофизических (c , L) характеристик сплавов. Полученные значения для различных по химическому составу компонентов сплава ТЛЗ (согласно матрице планирования) использовали для построения математических моделей, описывающих покомпонентное влияние элементов на указанные характеристики (табл. 4).

Т а б л и ц а 4. Результаты статистического анализа данных термодинамического моделирования сплава ТЛЗ

Расчетные параметры статистической модели	Моделируемые характеристики X						
	t_L , °C	t_S , °C	Δt_{LS} , °C	L , МДж/м ³	ρ_L , кг/м ³	ρ_S , кг/м ³	$\Delta \rho_{LS}$, кг/м ³
X_{\min} (минимум)	1687	1655	16	1418	3900	4006	80
X_{\max} (максимум)	1722	1685	58	1644	3977	4056	105
$\Delta X = X_{\max} - X_{\min}$ (интервал изменения)	35	30	42	226	77	50	25
$X_{\text{ср}}$ (среднее значение)	1706	1670	36	1530	3938	4029	92

Примечание: t_L , t_S – температуры ликвидуса и солидуса; Δt_{LS} – интервал кристаллизации сплава; L – теплота кристаллизации; ρ_L , ρ_S – плотность в жидком и твердом состоянии.

С применением описанного выше подхода, основанного на совместном использовании термодинамического моделирования, методики планирования экспериментов и аппарата математической статистики, получены регрессионные уравнения, в которых опущены статистически незначимые факторы:

$$t_L = 1705,86 + 0,7x_1 + 12,02x_2 + 1,69x_3 - 0,88x_4 - 1,78x_5 - 0,8x_6 - 0,94x_7 - 1,14x_1x_2 \text{ (°C)}, \quad (1)$$

$$t_S = 1669,69 + 1,04x_1 + 1,09x_2 + 1,76x_3 - 5,15x_4 - 6,75x_5 - 0,95x_6 - 1,81x_7 - 0,76x_1x_5 \text{ (°C)}, \quad (2)$$

$$\Delta t_{LS} = 36,2 + 10,9x_2 + 4,3x_4 + 5,0x_5 - 1,1x_1x_2 \text{ (°C)}, \quad (3)$$

$$L = 1520,19 + 44,88x_2 + 24,5x_3 + 13,88x_4 + 17,25x_5 + 21,31x_6 - 5,75x_1x_2 \text{ (МДж/м}^3\text{)}, \quad (4)$$

$$\rho_L = 3936,47 - 17,83x_1 - 6,29x_2 \text{ (кг/м}^3\text{)}, \quad (5)$$

$$\rho_S = 4028,83 - 16,67x_1 \text{ (кг/м}^3\text{)}, \quad (6)$$

$$\Delta \rho_{LS} = 92,36 + 3,25x_2 + 3,72x_3 + 4,72x_5 \text{ (кг/м}^3\text{)}, \quad (7)$$

где x_1 – Al; x_2 – N; x_3 – O; x_4 – Fe; x_5 – H; x_6 – C; x_7 – Si – содержание компонентов в сплаве, вес.%.

Результаты статистического анализа данных термодинамического моделирования свидетельствуют о значительном влиянии варьирования химического состава сплава в заданных пределах на его равновесные характеристики, знак и величина которых изменяются с различной интенсивностью. Наиболее существенно роль химического состава сплава проявляется в изменении критических температур ликвидуса и солидуса, что может приводить к многократному изменению величины температурного интервала кристаллизации.

Скрытая теплота кристаллизации, оказывающая важное влияние на температурный темп выделения твердой фазы и кинетику формирования кристаллической структуры, может при варьировании содержания компонентов отклоняться до 10% относительно средних значений. Эти выявленные путем моделирования результаты означают, что при проведении компьютерных расчетов теплофизических, кристаллизационных и усадочных процессов некорректная замена фактических параметров (теплоты кристаллизации, интервала затвердевания, коэффициентов объемной и линейной усадки) условными или осредненными значениями может приводить к значительным погрешностям в оценке хода и результатов литейных процессов.

Полученные модели для температурно-зависимых характеристик сплава ТЛЗ, а также построенные по предложенной методике аналогичные уравнения равновесных характеристик для других литейных титановых сплавов могут быть рекомендованы и использованы в качестве информационного обеспечения для различных СКМ ЛП (Полигон, LWMFlow, POLYCAST, ProCast и др.) с целью взаимной корректировки и унификации наиболее надежных результатов в связи с известным различием публикуемых баз термодинамических данных [7–9].

Для повышения адекватности компьютерного моделирования процессов формирования достаточно сложных и ответственных отливок при прогнозировании параметров формирующейся структуры и литейных дефектов необходима разработка комплексного программного обеспечения, которое способно генерировать универсальный набор параметров, необходимых для принятия технологических решений (рис. 3). Представленные в схеме блоки обладают в настоящее время той или иной компьютерной реализацией [10–13 и др.], которая предполагает радикальное совершенствование средств технологического проектирования, а также формирование причинно-следственных связей между ними для сопряженной реализации моделирующих процедур и критериальной диагностики литейных процессов с целью обеспечения адекватности и оптимальности принимаемых решений.

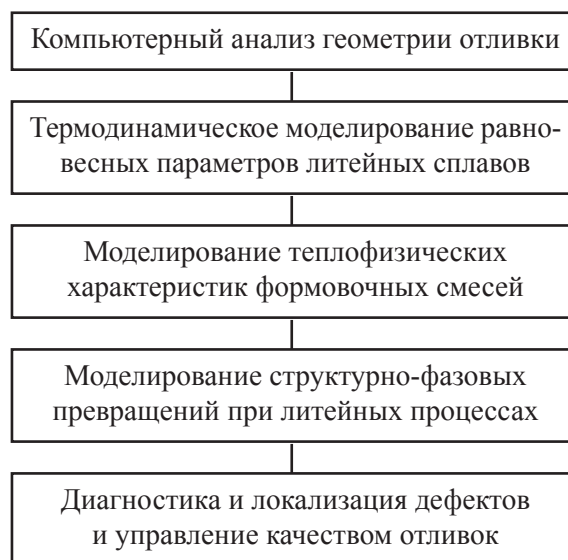


Рис. 3. Принципиальная схема комплексного программного обеспечения для перспективного (цифрового) проектирования литейной технологии

ЛИТЕРАТУРА

1. Ушков С. С. и др. Производство и применение литых изделий из сплавов на основе титана // Вопросы материаловедения. 1999. № 3. С. 126–137.
2. Кудрявцев А. С., Молчанова Н. Ф., Травин В. В. Свариваемые литейные титановые сплавы в элементах оборудования энергетических комплексов // Титан. 2009. № 2. С. 47–53.
3. Nastac L. Advances in investment casting of Ti-6Al-4V alloy: a review / L. Nastac, M. N. Gungor, I. Uçok et al // Int. J. Cast Metals Research. 2006. Vol. 19. No 2. P. 73–93.
4. Голод В. М. Компьютерный анализ литейной технологии, проблемы его информационного обеспечения и адаптации к условиям производства // Вест. Удмуртского ун-та. 2008. № 1. С. 67–87.
5. Баженов В. Е., Колтыгин А. В., Фадеев А. В. Использование программы ProCast для моделирования процесса получения отливок из сплава TNM-B1 на основе алюминидов титана литьем в керамические формы // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2013. № 6. С. 9–13.
6. Голод В. М. Вычислительная термодинамика в материаловедении: учеб. пособие / В. М. Голод, К. Д. Савельев. СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2010. 217 с.
7. Thermo-Calc. Thermodynamics and Properties Software Thermo-Calc. <https://thermocalc.com>.
8. Pandat Software. An Integrated Simulation Platform for Materials Design. – <https://computherm.com/software>.
9. JMatPro. Sente Software Ltd. Program JMatPro mesoscale computation materials engineering software. – <https://www.sente-software.co.uk/jmatpro>.
10. Иксанов М. В., Молчанова Н. Ф., Голод В. М. Компьютерный анализ влияния марочного состава литейного титанового сплава системы Ti-Al-V-Mo-C на образование усадочных дефектов в отливке // Литейное производство сегодня и завтра: сб. науч. тр. конф. СПб.: Изд-во Культ-информ-пресс, 2016. С. 268–275.
11. Иксанов М. В., Голод В. М. Расчет параметров дендритной структуры сплава Ti-Al // Литейное производство сегодня и завтра: сб. науч. тр. конф. СПбПУ Петра Великого, 2018. Т. 1. Ч. 1. С. 178–180.
12. Иксанов М. В., Голод В. М. Компьютерный термодинамический анализ литейного титанового сплава системы Ti-Al-V // Литейное производство. 2018. № 10. С. 17–19.

13. Иксанов М.В., Голод В.М. Компьютерный анализ влияния химического состава литейного титанового сплава на кинетику процесса кристаллизации и параметры дендритной структуры // Литейное производство сегодня и завтра: сб. науч. тр. СПб.: Изд-во Култ-информ-пресс, 2020. С. 23–40.

REFERENCES

1. Ushkov S.S. et. al. *Proizvodstvo i primenenie lityh izdelij iz splavov na osnove titana* [Production and application of cast products from alloys based on titanium]. *Voprosy materialovedeniya = Questions of materials science*, 1999, no. 3, pp. 126–137.
2. Kudrjavcev A.S., Molchanova N.F., Travin V.V. Svarivaemye litejnye titanovye splavy v jelementah oborudovanija jenergeticheskikh kompleksov [Weldable cast titanium alloys in the elements of equipment of power plants]. *Titan = Titanium*, 2009, no. 2, pp. 47–53.
3. Nastac L. Advances in investment casting of Ti-6Al-4V alloy: a review / L. Nastac, M.N. Gungor, I. Ucok et al. *Int. J. Cast Metals Research*, 2006, vol. 19, no. 2, pp.73–93.
4. Golod V.M. Komp'juternyj analiz litejnoj tehnologii, problemy ego informacionnogo obespechenija i adaptacii k uslovijam proizvodstva [Computer analysis of foundry technology, problems of its information support and adaptation to production conditions]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta = Bulletin of the Udmurt University*, 2008, no. 1, pp. 67–87.
5. Bazhenov V.E., Koltjgin A.V., Fadeev A.V. Ispol'zovanie programmy ProCast dlja modelirovanija processa poluchenija otlivok iz splava TNM-B1 na osnove aljuminida titana lit'jom v keramicheskie formy [Using the ProCast program to simulate the process of obtaining castings from the TNM-B1 alloy based on titanium aluminate by casting into ceramic molds]. *Izvestija vuzov. Cvetnaja metallurgija = Izvestiya vuzov. Non-ferrous metallurgy*, 2013, no. 6, pp. 9–13.
6. Golod V.M., Savel'ev K.D. *Vychislitel'naja termodinamika v materialovedenii* [Computational thermodynamics in materials science]. Sankt-Peterburg, Izdatel'stvo Politehnicheskogo universiteta Publ., 2010, 217 p.
7. Thermo-Calc. Thermodynamics and Properties Software Thermo-Calc. <https://thermocalc.com>.
8. Pandat Software. An Integrated Simulation Platform for Materials Design. <https://computherm.com/software>.
9. JMatPro. Sente Software Ltd. Program JMatPro mesoscale computation materials engineering software. <https://www.sentesoftware.co.uk/jmatpro>.
10. Iksanov M.V., Molchanova N.F., Golod V.M. Komp'juternyj analiz vlijanija marochnogo sostava litejnogo titanovogo splava sistemy Ti-Al-V–Mo-C na obrazovanie usadochnyh defektov v otlivke [Computer analysis of the influence of the grade composition of the cast titanium alloy of the Ti-Al-V–Mo-C system on the formation of shrinkage defects in the casting]. Sankt-Peterburg, Izdatel'stvo Kul't-inform-press Publ. *Litejnoe proizvodstvo segodnja i zavtra = Foundry today and tomorrow*, 2016, pp. 268–275.
11. Iksanov M.V., Golod V.M. Raschjot parametrov dendritnoj struktury splava Ti-Al [Calculation of the parameters of the dendritic structure of the Ti-Al alloy]. Sankt-Peterburg, *Litejnoe proizvodstvo segodnja i zavtra = Foundry production today and tomorrow*, 2018, vol. 1, ch. 1, pp. 178–180.
12. Iksanov M.V., Golod V.M. Komp'juternyj termodinamicheskij analiz litejnogo titanovogo splava sistemy Ti-Al-V [Computer thermodynamic analysis of cast titanium alloy of the Ti-Al-V system]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*, 2018, no. 10, pp. 17–19.
13. Iksanov M.V., Golod V.M. Komp'juternyj analiz vlijanija himicheskogo sostava litejnogo titanovogo splava na kinetiku processa kristallizacii i parametry dendritnoj struktury [Computer analysis of the influence of the chemical composition of the cast titanium alloy on the kinetics of the crystallization process and the parameters of the dendritic structure]. Sankt-Peterburg, Izdatel'stvo Kul't-inform-press Publ., *Litejnoe proizvodstvo segodnja i zavtra = Foundry production today and tomorrow*, 2020, pp. 23–40.