УДК 532.13+546.73'27'28

Исследования вязкости тернарных расплавов $\text{Co}_{81}(\text{B},\text{Si})_{19}$ и $\text{Co}_{75}(\text{B},\text{Si})_{25}$

А. Л. Бельтюков, Н. В. Олянина, В. И. Ладьянов

Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Россия, 426067, Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34

Аннотация. Изучены температурные зависимости кинематической вязкости расплавов тернарных систем $\text{Co}_{81}(\text{B},\text{Si})_{19}$ и $\text{Co}_{75}(\text{B},\text{Si})_{25}$. Политермы жидких сплавов, полученные в режимах нагрева и охлаждения, совпадают и хорошо описываются экспоненциальным уравнением Аррениуса. По политермам построены концентрационные зависимости вязкости тернарных систем для квазибинарных срезов $\text{Co}_{81}\text{B}_{19}\text{-Co}_{81}\text{Si}_{19}$ и $\text{Co}_{75}\text{B}_{25}\text{-Co}_{75}\text{Si}_{25}$ при фиксированных температурах. Изотермы вязкости квазибинарных срезов близки к аддитивной сумме значений бинарных сплавов с небольшим положительным отклонением. Проведены расчеты концентрационных зависимостей динамической вязкости расплавов систем $\text{Co}_{81}\text{B}_{19}\text{-Co}_{81}\text{Si}_{19}$ и $\text{Co}_{75}\text{B}_{25}\text{-Co}_{75}\text{Si}_{25}$ по семи уравнениям, основанным на данных о термодинамических свойствах расплава и/или физических свойствах его компонентов. Для обеих систем наилучшее совпадение с экспериментальными данными показывает уравнение Козлова-Романова-Петрова.

Ключевые слова: расплав, система Co-B-Si, вязкость, температурная зависимость вязкости, уравнение Аррениуса, концентрационная зависимость вязкости, уравнения для расчета изотерм вязкости.

✉ Анатолий Бельтюков, e-mail: albeltyukov@mail.ru

Investigations of the Viscosity of the Ternary $\text{Co}_{81}(\text{B},\text{Si})_{19}$ and $\text{Co}_{75}(\text{B},\text{Si})_{25}$ Melts

Anatoly L. Beltyukov, Natalia V. Olyanina, Vladimir I. Ladyanov

Udmurt Federal Research Center UB RAS (34, T. Baramzina St., Izhevsk, 426067, Russian Federation)

Summary. The temperature (polytherms) and concentration (isotherms) dependences of the kinematic viscosity of melts of the ternary $\text{Co}_{81}(\text{B},\text{Si})_{19}$ and $\text{Co}_{75}(\text{B},\text{Si})_{25}$ systems have been experimentally studied. The polytherms of liquid alloys obtained in the heating and cooling regimes coincide and are well described by the exponential Arrhenius equation. The concentration dependences of the viscosity of ternary systems for the quasi-binary $\text{Co}_{81}\text{B}_{19}\text{-Co}_{81}\text{Si}_{19}$ and $\text{Co}_{75}\text{B}_{25}\text{-Co}_{75}\text{Si}_{25}$ sections at fixed temperatures were plotted using polytherms. For both systems, the extreme points on the viscosity isotherms corresponding to binary alloys have similar values at the same temperatures. The viscosity isotherms of the quasi-binary sections are close to the additive sum of the viscosity values of binary alloys with a small positive deviation. When the temperature of the melt changes the character of the viscosity isotherms does not change significantly. The calculations of the concentration dependences of the dynamic viscosity of the melts of the $\text{Co}_{81}\text{B}_{19}\text{-Co}_{81}\text{Si}_{19}$ and $\text{Co}_{75}\text{B}_{25}\text{-Co}_{75}\text{Si}_{25}$ systems were carried out according to the equations based on the data on the thermodynamic properties of the melt and/or the physical properties of its components. The calculations were carried out according to the following equations: Kozlov-Romanov-Petrov; Kaptay; Chhabra; Sato; Hirai; Budai-Benkő-Kaptay and Živković-(Budai-Benkő-Kaptay). For both ternary systems, the best agreement with the experimental data is shown by the Kozlov-Romanov-Petrov equation both in the nature of the isotherm and in the viscosity values. The maximum relative deviation of the viscosity isotherm calculated by the Kozlov-Romanov-Petrov equation from the isotherm obtained in the experiment does not exceed 15 %.

Keywords: melt, Co-B-Si system, viscosity, temperature dependence of viscosity, Arrhenius equation, concentration dependence of viscosity, equations for calculating viscosity isotherms.

✉ Anatoly Beltyukov, e-mail: albeltyukov@mail.ru

ВВЕДЕНИЕ

Сплавы на основе системы Co-B-Si обладают высокой способностью к аморфизации и применяются в качестве основы для получения перспективных аморфных и нанокристаллических магнитомягких материалов [1, 2]. Такие материалы применяются в качестве магнитопроводов при изготовлении широкого спектра изделий, в частности, силовых трансформаторов, трансформаторов тока, прецизионных датчиков тока, различных дросселей и т.д. Относительно недавно на основе данной системы были получены сплавы с объемной аморфизацией [3], что значительно расширяет область их возможного применения.

Основным способом получения аморфных сплавов является сверхбыстрая закалка расплава. Между тем известно, что структурное состояние расплава перед закалкой может оказывать существенное влияние на его аморфизирующую способность и эксплуатационные свойства получаемых сплавов, например [4]. В связи с этим, исследования особенностей структурного состояния и физико-химических свойств расплавов, в том числе и вязкости, являются весьма полезными при разработке новых аморфных сплавов и технологии их получения.

Металлические сплавы с высокой аморфизирующей способностью, в основном, содержат большое количество компонентов, и экспериментальные измерения их вязкости в зависимости от состава является трудоёмкой задачей. В настоящее время в литературе известно достаточно большое количество уравнений (моделей), позволяющих вычисление вязкости металлических расплавов многокомпонентных систем с использованием экспериментальных данных для более простых систем и/или данных термодинамических свойств, например [5, 6]. Для проверки адекватности моделей и применяемых при расчете уравнений необходима их апробация на модельных системах, имеющих надежные вискозиметрические данные. Большинство известных уравнений апробированы на бинарных и тернарных системах металл-металл с относительно низкими температурами плавления (до 1200 °C) [6]. Ранее нами были проведены расчеты концентрационной зависимости вязкости расплавов бинарных систем Co-B [7] и Co-Si [8, 9] с использованием ряда уравнений, из которых уравнение Козлова-Романова-Петрова [10] демонстрирует наилучшее совпадение с экспериментальными данными для обеих систем.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований вязкости расплавов тернарной системы Co-B-Si с содержанием кобальта 19 и 25 ат.%. Проведены расчеты концентрационной зависимости динамической вязкости для квазибинарных срезов $\text{Co}_{81}\text{B}_{19}$ - $\text{Co}_{81}\text{Si}_{19}$ и $\text{Co}_{75}\text{B}_{25}$ - $\text{Co}_{75}\text{Si}_{25}$ и проведено их сопоставление с экспериментальными данными.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы тернарных систем $\text{Co}_{81}(\text{B},\text{Si})$ и $\text{Co}_{75}(\text{B},\text{Si}_{25})$ получали сплавлением бинарных сплавов $\text{Co}_{81}\text{B}_{19}$ с $\text{Co}_{81}\text{Si}_{19}$ и $\text{Co}_{75}\text{B}_{25}$ с $\text{Co}_{75}\text{Si}_{25}$, соответственно, в печи вискозиметра непосредственно перед измерениями. Бинарные сплавы (лигатуры) выплавили в вакуумной печи сопротивления сплавлением кобальта с бором либо кремнием в корундовом тигле при температуре 1550 °C и давлении 10^{-2} Па. При выплавке лигатур использовали порошки чистого кобальта (массовое содержание кобальта не менее 99.35 %), аморфного бора и монокристаллического кремния. При сплавлении образец нагревали до 1680 °C (с целью гомогенизации) и охлаждали до температуры на 100 – 150 °C ниже температуры его затвердевания с изотермической выдержкой при максимальной и минимальной температурах в течение 10 мин. Далее образец нагревали выше температуры ликвидуса сплава и начинали процедуру измерений вязкости. Данный режим переплава позволяет исключить влияние на результаты измерений вязкости необратимых процессов, обусловленных сплавлением исходных шихтовых материалов и взаимодействием расплава с материалом тигля [11].

Для определения вязкости использовали метод крутильных колебаний цилиндрического тигля с расплавом [12]. Измерения проводили на автоматизированной установке [13] в защитной атмосфере гелия марки А (объемная доля гелия $\geq 99.995\%$) в тиглях из Al_2O_3 с плавающей крышкой. Схема тигля с крышкой представлена в работе [14]. Крышка в ходе измерений создает вторую торцевую поверхности трения. Её использование позволяет исключить негативное влияние на результаты измерений явлений смачивания и пленочных эффектов [15], что существенно повышает достоверность получаемых данных.

Температурную зависимость вязкости измеряли в режимах нагрева до 1700°C и последующего охлаждения до начала кристаллизации расплава с шагом $15 - 25^\circ\text{C}$ с изотермическими выдержками на каждой температуре в течение $5 - 10$ мин. Значения декремента затухания, кинематической вязкости и погрешностей их определения вычисляли по методике, подробно изложенной в работе [13]. Необходимые при расчете вязкости значения плотности расплавов, вычислили по данным плотности жидких сплавов бинарных систем Co-B [16] и Co-Si [17], принимая линейную зависимость плотности от концентрации и температуры. Общая относительная погрешность определения декремента затухания и кинематической вязкости не превышает соответственно 0.4% и 4% . Погрешность измерения вязкости в единичном эксперименте не превышает 2% .

УРАВНЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ВЯЗКОСТИ

К настоящему времени в литературе предложено достаточно много уравнений для прогнозирования зависимости вязкости от концентрации жидких бинарных и многокомпонентных сплавов на основании данных по вязкости его компонентов и термодинамических свойств системы. В данной работе вычисления вязкости провели по уравнениям, удовлетворяющим следующим трем критериям: возможность вычисления вязкости многокомпонентных систем (три и более компонента); доступность необходимых для расчета данных; максимальное отклонение результатов расчета вязкости от экспериментальных данных для бинарных систем Co-B и Co-Si не более 50% (по данным работы [9]). Уравнения, удовлетворяющие данным критериям, перечислены ниже. В рассмотренных уравнениях применены следующие обозначения: η – коэффициент динамической вязкости жидкого сплава, η_i и x_i – динамическая вязкость и мольная доля компонентов расплава, V_i и M_i – молярные объем и масса чистого компонента, n – число компонентов в сплаве, R – газовая постоянная, T – температура, h и N_A – постоянные Планка и Авогадро, ΔH – интегральная энтальпия образования (смешения) расплава, ΔS_E – интегральная избыточная энтропия смешения.

Уравнение Козлова-Романова-Петрова [10]

$$\ln \eta = \sum_{i=1}^n x_i \cdot \ln \eta_i - \frac{\Delta H}{3RT}.$$

Уравнение Каптай [18]

$$\eta = \frac{h \cdot N_A}{\sum_{i=1}^2 (x_i \cdot V_i) + V^E} \cdot \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^2 (x_i \cdot \Delta G_i^*) - \alpha \cdot \Delta H}{R \cdot T} \right),$$

где V^E – избыток молярного объема при образовании сплава, которым можно пренебречь [18]; ΔG_i^* – свободная энергия активации вязкого течения чистых компонентов, вычисляемая

по формуле $\Delta G_i^* = R \cdot T \cdot \ln \left(\frac{\eta_i \cdot V_i}{h \cdot N_A} \right)$; $\alpha = 0.155 \pm 0.015$.

Уравнение Chabра [19]

$$\lg(\eta + 1) = 10^a \cdot T^b,$$

где $a = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot a_i)$, $b = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot b_i)$. Коэффициенты a_i и b_i рассчитываются аппроксимацией уравнением Chabра зависимости вязкости чистых компонентов от температуры.

Уравнение Sato [20]

$$\ln \eta = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot \ln A_i) + \frac{\sum_{i=1}^n (x_i \cdot E_i)}{R \cdot T},$$

где A_i и E_i – предэкспоненциальный множитель и энергия активации в уравнении, описывающем зависимость вязкости чистого компонента от температуры, $\eta_i = A_i \exp\left(\frac{E_i}{RT}\right)$.

Уравнение Hirai [21]

$$\eta = 1.7 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\rho^{2/3} \cdot T_m^{1/2}}{M^{1/6}} \cdot \exp\left[\frac{2.65 \cdot T_m^{1.27}}{R} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_m}\right)\right],$$

где $\rho = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot \rho_i)$, ρ_i – плотность чистого компонента при 20 °C, T_m – температура ликвидуса сплава (K).

Уравнение Budai-Benkö-Kaptay [22]

$$\eta = A \cdot \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i \cdot M_i)}}{\left[\sum_{i=1}^n (x_i \cdot V_i) + V^E\right]^{2/3}} \cdot \sqrt{T} \cdot \exp\left[\frac{B}{T} \cdot \left(\sum_{i=1}^n (x_i \cdot T_{m,i}) - \frac{\Delta H}{q \cdot R}\right)\right],$$

где $A = (1.80 \pm 0.39) \cdot 10^{-8}$ (Дж/К·моль^{1/3})^{1/2}, $B = 2.34 \pm 0.20$, $q = 25.4 \pm 2.0$ и $T_{m,i}$ – температура плавления компонента.

Уравнение Živković-(Budai-Benkö-Kaptay) [23] – это модификация уравнения Budai-Benkö-Kaptay, в котором $T_{m,i}$ заменена на эффективную температуру плавления компонентов

$$T_{m,i}^* = \frac{T}{B} \cdot \ln\left(\frac{\eta_i V_i^{2/3}}{A \cdot \sqrt{M_i T}}\right).$$

Изотермы динамической вязкости квазибинарных срезов Co₈₁B₁₉-Co₈₁Si₁₉ и Co₇₅B₂₅-Co₇₅Si₂₅ рассчитаны при температуре 1627 °C. Используемые при вычислении данные по плотности и динамической вязкости чистых компонентов приведены в таблице. Динамическая вязкость кобальта вычислена по данным кинематической вязкости [7] и плотности [17]. Для чистого бора использовали значения плотности и вязкости при температуре плавления, применение которых позволяет получить лучшее согласие с экспериментом для системы Co-B [7]. Термодинамические данные заимствованы из работы [24], температуры ликвидуса сплавов – из [25].

Таблица – Значения плотности и динамической вязкости компонентов сплава, используемые при расчете изотерм вязкости расплавов

Table – Values of density and dynamic viscosity of alloy components used in calculating viscosity isotherms of melts

Компоненты сплава Alloy components	ρ , кг/м ³ при температуре		η , 10 ⁻³ Па·с (при 1627 °C)
	20 °C	1627 °C	
Кобальт (Co)	8900 [26]	7816 [16]	3.96±0.18
Кремний (Si)	2340 [26]	2505±12 [28]	0.506±0.014 [30]
Бор (B)	2330 [27]	2170±43* [29]	2.6±0.3* [31]

* для жидкого бора при температуре плавления / for liquid boron at melting point

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведены измерения температурной зависимости кинематической вязкости жидких сплавов $\text{Co}_{81}\text{B}_x\text{Si}_{19-x}$ ($x = 0, 3, 7, 10, 13, 17, 19$) и $\text{Co}_{75}\text{Si}_{25-y}\text{B}_y$ ($y = 0, 3, 7, 10, 12.5, 17, 20, 23, 25$). Температурные зависимости (политермы) исследованных расплавов имеют монотонный характер и описываются экспоненциальным уравнением Аррениуса. Типичные политермы вязкости представлены на рис. 1.

Рис. 1. Типичные температурные зависимости вязкости расплавов: линия 1 – расплав $\text{Co}_{81}\text{B}_7\text{Si}_{12}$, линия 2 – $\text{Co}_{81}\text{B}_{10}\text{Si}_9$, линия 3 – $\text{Co}_{75}\text{B}_7\text{Si}_{18}$, линия 4 – $\text{Co}_{75}\text{B}_{20}\text{Si}_5$ (точки, обозначенные закрашенными символами, получены в режиме нагрева, не закрашенными – в режиме охлаждения)

Fig. 1. Typical temperature dependences of the viscosity of melts: line 1 - $\text{Co}_{81}\text{B}_7\text{Si}_{12}$ melt, line 2 - $\text{Co}_{81}\text{B}_{10}\text{Si}_9$ melt, line 3 - $\text{Co}_{75}\text{B}_7\text{Si}_{18}$ melt, line 4 - $\text{Co}_{75}\text{B}_{20}\text{Si}_5$ melt (the points indicated by filled symbols are obtained in heating regime, not filled symbols - in cooling regime)

По политермам определены значения вязкости при фиксированных температурах и построены зависимости вязкости от концентрации (изотермы) для квазибинарных срезов $\text{Co}_{81}\text{B}_{19}\text{-Co}_{81}\text{Si}_{19}$ и $\text{Co}_{75}\text{B}_{25}\text{-Co}_{75}\text{Si}_{25}$ (рис. 2). Из рис. 2 видно, что для обеих тернарных систем $\text{Co}_{81}(\text{B},\text{Si})_{19}$ и $\text{Co}_{75}(\text{B},\text{Si})_{25}$ крайние точки на изотермах вязкости, соответствующие бинарным сплавам, при одинаковых температурах имеют близкие значения. При замене атомов кремния атомами бора вязкость расплава изменяются слабо. Изотермы вязкости квазибинарных срезов близки к аддитивной сумме значений вязкости бинарных сплавов с небольшим положительным отклонением. Характер изотерм вязкости при изменении температуры расплава существенно не изменяется.

Рис. 2. Концентрационные зависимости кинематической вязкости расплавов $\text{Co}_{81}(\text{B,Si})_{19}$ (a) и $\text{Co}_{75}(\text{B,Si})_{25}$ (b) при температурах 1300 °C и 1600 °C

Fig. 2. Concentration dependences of the kinematic viscosity of $\text{Co}_{81}(\text{B,Si})_{19}$ (a) and $\text{Co}_{75}(\text{B,Si})_{25}$ (b) melts at temperatures of 1300 °C and 1600 °C

Согласно методологии физико-химического анализа жидких растворов [32] близкие к линейным зависимости вязкости от температуры характерны для систем со слабым химическим взаимодействием между компонентами смеси. Подобные (близкие к линейным) изотермы вязкости были получены ранее для расплавов квазибинарных срезов системы Fe-B-Si [33, 34]. Согласно исследованиям структуры [35, 36] в жидких сплавах системы Fe-B-Si реализуется химически микронеоднородное строение с образованием микрогруппировок атомов с ближним упорядочением характерным для расплавов бинарных систем Fe-B и Fe-Si. При этом отмечается сильное химическое взаимодействие в парах атомов Fe-B и Fe-Si и тенденция к взаимному отталкиванию между атомами B и Si [36].

Расплавы бинарных систем Co-B и Co-Si так же характеризуются сильным химическим взаимодействием между атомами разного сорта, о чем свидетельствуют отрицательные отклонения активностей компонентов от закона Рауля во всей области концентраций [37], экстремальный характер изотерм вязкости [7, 38], и результаты исследования их структуры [39, 40]. В жидких сплавах этих систем реализуется химически микронеоднородная структура, содержащая относительно устойчивые микрогруппировки из атомов разного сорта, объемная доля и химический состав которых зависят от содержания элементов в сплаве. В частности, в области богатой кобальтом (содержание Co более 70 %) в расплавах присутствуют микрогруппировки типа соединения Co_2B (в системе Co-B) и Co_2Si (в системе Co-Si).

По аналогии с системой Fe-B-Si, в тернарных расплавах $\text{Co}_{81}(\text{B,Si})_{19}$ и $\text{Co}_{75}(\text{B,Si})_{25}$, по-видимому, сохраняются прочные межатомные связи в парах атомов Co-B и Co-Si, между атомами бора и кремния связи не образуются. Данное предположение подтверждается близостью к линейной зависимости изотерм интегральных энтальпии и избыточной энтропии образования расплава в квазибинарных системах $\text{Co}_{81}\text{B}_{19}\text{-Co}_{81}\text{Si}_{19}$ и $\text{Co}_{75}\text{B}_{25}\text{-Co}_{75}\text{Si}_{25}$ [24]. Таким образом, можно полагать, что в расплавах $\text{Co}_{81}(\text{B,Si})_{19}$ и $\text{Co}_{75}(\text{B,Si})_{25}$ реализуется химически микронеоднородная структура, составляющими которой являются атомные микрогруппировки с ближним упорядочением характерным для сплавов бинарных систем Co-B и Co-Si в этом интервале концентраций. Изменение концентрации бора и кремния при фиксированном содержании кобальта сопровождается изменением объемной доли микрогруппировок каждого типа. При нагревании структура расплавов не претерпевает резких изменений, что подтверждается отсутствием гистерезиса их политерм вязкости, полученных при нагреве и последующем охлаждении и сохранением вида изотерм вязкости расплавов.

На рис. 3 приведены изотермы динамической вязкости расплавов $\text{Co}_{81}(\text{B},\text{Si})_{19}$ и $\text{Co}_{75}(\text{B},\text{Si})_{25}$, рассчитанные по перечисленным ранее уравнениям совместно с изотермами, полученными в эксперименте. Экспериментальные изотермы динамической вязкости вычислены по формуле $\eta = \nu \cdot \rho$, где ν – кинематическая вязкость расплава, полученная в эксперименте, ρ – его плотность. Плотность тернарных расплавов была вычислена по данным плотности жидких бинарных сплавов Co-B [16] и Co-Si [17], принимая аддитивную зависимость плотности от концентрации.

Рис. 3. Рассчитанные зависимости динамической вязкости от концентрации легирующих элементов для систем $\text{Co}_{81}(\text{B},\text{Si})_{19}$ (a) и $\text{Co}_{75}(\text{B},\text{Si})_{25}$ (b) при 1627 °C по уравнениям: 1 – ур. Козлова-Романова-Петрова; 2 – ур. Картая; 3 – ур. Chhabra; 4 – ур. Sato; 5 – ур. Hirai; 6 – ур. Budai-Benkö-Kaptay; 7 – ур. Živković-(Budai-Benkö-Kaptay); 8 – ур. Козлова-Романова-Петрова*; • – данные эксперимента

Fig. 3. Calculated dependences of dynamic viscosity on the concentration of alloying elements for $\text{Co}_{81}(\text{B},\text{Si})_{19}$ (a) and $\text{Co}_{75}(\text{B},\text{Si})_{25}$ (b) systems at 1627 °C according to the equations: 1 – Kozlov-Romanov-Petrov; 2 – Kaptay; 3 – Chhabra; 4 – Sato; 5 – Hirai; 6 – Budai-Benkö-Kaptay; 7 – Živković-(Budai-Benkö-Kaptay); 8 – Kozlov-Romanov-Petrov*; • – experimental data

Из рис. 3 видно, что практически все использованные уравнения, за исключением уравнения Hirai, применительно к системам $\text{Co}_{81}\text{B}_{19}\text{-Co}_{81}\text{Si}_{19}$ и $\text{Co}_{75}\text{B}_{25}\text{-Co}_{75}\text{Si}_{25}$ показывают монотонную зависимость вязкости от концентрации. Такое поведение изотерм вязкости объясняется близостью к линейной зависимости термодинамических функций,

используемых при вычислении вязкости [24]. Для обеих тернарных систем наилучшее совпадение с экспериментальными данными демонстрирует изотерма, полученная по уравнению Козлова-Романова-Петрова. Максимальное относительное отклонение изотерм вязкости, рассчитанных по данному уравнению от изотерм, полученных в эксперименте, не превышает 15 %.

Для всех апробированных в данной работе уравнений отклонение рассчитанных значений вязкости от полученных в эксперименте преимущественно определяется расхождением в вычислениях вязкости для бинарных систем. В данном случае увеличение точности прогнозирования значений вязкости тернарных и многокомпонентных систем возможно за счёт введения в уравнения поправки на значения вязкости бинарных систем.

В настоящей работе нами проведены вычисления изотерм вязкости тернарных расплавов с поправкой на значения вязкости бинарных систем по уравнению Козлова-Романова-Петрова

$$\eta^*_{\text{Co}_{100-(x+y)}\text{B}_x\text{Si}_y} = \eta_{\text{Co}_{100-(x+y)}\text{B}_x\text{Si}_y} - \Delta\eta, \quad (1)$$

где $\eta_{\text{Co}_{100-(x+y)}\text{B}_x\text{Si}_y}$ – вязкость тернарного сплава, рассчитанная по уравнению Козлова-Романова-Петрова;

$$\Delta\eta = \frac{x}{x+y} \cdot (\eta_{\text{KRP}} - \eta_{\text{exp}})_{\text{Co}_{100-(x+y)}\text{B}_{(x+y)}} + \frac{y}{x+y} \cdot (\eta_{\text{KRP}} - \eta_{\text{exp}})_{\text{Co}_{100-(x+y)}\text{Si}_{(x+y)}};$$

x и y – концентрация бора и кремния в тернарном сплаве в атомных долях, $(\eta_{\text{KRP}} - \eta_{\text{exp}})$ – разность рассчитанных по уравнению Козлова-Романова-Петрова и экспериментально полученных значений вязкости для расплавов бинарных систем.

Изотермы вязкости, рассчитанные по формуле (1), приведены на рис. 3 (линия 8). Для обеих тернарных систем относительное отклонение данных изотерм от изотерм, полученных в эксперименте, не превышает 8 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально изучены зависимости кинематической вязкости от температуры для расплавов тернарных систем $\text{Co}_{81}(\text{B},\text{Si})_{19}$ и $\text{Co}_{75}(\text{B},\text{Si})_{25}$ в режиме нагрева и последующего охлаждения в интервале температур от ликвидуса до 1700 °С. Значения вязкости жидких сплавов, полученные в режимах нагрева и охлаждения, совпадают. Температурная зависимость описывается экспоненциальным уравнением Аррениуса.

По температурным зависимостям определены значения вязкости при фиксированных температурах и построены концентрационные зависимости для квазибинарных срезов $\text{Co}_{81}\text{B}_{19}\text{-Co}_{81}\text{Si}_{19}$ и $\text{Co}_{75}\text{B}_{25}\text{-Co}_{75}\text{Si}_{25}$. Расплавы бинарных систем Co-B и Co-Si с одинаковым содержанием второго элемента при одинаковых температурах имеют близкие значения вязкости. Изотермы вязкости квазибинарных срезов близки к аддитивной сумме значений вязкости бинарных сплавов с небольшим положительным отклонением. При изменении температуры расплава характер изотерм вязкости существенно не изменяется. Слабая концентрационная зависимость вязкости для квазибинарных срезов объясняется сохранением в тернарных расплавах прочных межатомных связей в парах атомов Co-Si и Co-B при отсутствии связи между атомами бора и кремния. По-видимому, в расплавах Co-B-Si реализуется химически микронеоднородная структура, составляющими которой являются атомные микрогруппировки с ближним упорядочением характерным для сплавов бинарных систем Co-Si и Co-B в этом интервале концентраций.

Проведены расчеты концентрационных зависимостей динамической вязкости расплавов систем $\text{Co}_{81}\text{B}_{19}\text{-Co}_{81}\text{Si}_{19}$ и $\text{Co}_{75}\text{B}_{25}\text{-Co}_{75}\text{Si}_{25}$ по уравнениям, основанным на данных о термодинамических свойствах расплава и свойствах его компонентов. Расчеты проведены по следующим уравнениям: ур. Козлова-Романова-Петрова; ур. Картая; ур. Chhabra; ур. Sato; ур. Hirai; ур. Budai-Benkö-Kartay и ур. Živković-(Budai-Benkö-Kartay). Для обеих тернарных

систем наилучшее совпадение с экспериментальными данными, как по значениям вязкости, так и характеру изотермы показывает уравнение Козлова-Романова-Петрова. Максимальное относительное отклонение изотерм вязкости, рассчитанных по уравнению Козлова-Романова-Петрова от изотерм, полученных в эксперименте, не превышает 15 %.

Работа выполнена по теме НИР (№ 121030100001-3).

This work has been carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of Russia (No. 121030100001-3).

При выполнении работ было использовано оборудование Центра коллективного пользования "Центр физических и физико-химических методов анализа, исследования свойств и характеристик поверхности, наноструктур, материалов и изделий" УдмФИЦ УрО РАН.

Studies were performed using equipment of Core shared research facilities "Center of physical and physical-chemical methods of analysis, investigations of properties and characteristics surface, nanostructures, materials and samples" of UdmFRC UB RAS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bormio-Nunes C., Nunes C. A., Coelho A. A., Faria M. I. T. S., Suzuki P. A., Coelho G. C. Magnetization studies of binary and ternary Co-rich phases of the Co-Si-B system // Journal of Alloys and Compounds, 2010, vol. 508, pp. 5-8. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.08.019>
2. Yarmoshchuk Y. I., Nakonechna O. I., Semenko M. P., Zakharenko M. I. Magnetic and transport properties of Co-Si-B metallic glasses with complex dopants // Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2014, vol. 367, pp. 15-18. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.04.078>
3. Zhu C. L., Wang Q., Wang Y. M., Qiang J. B., Dong C. Co-B-Si-Ta bulk metallic glasses designed using cluster line and alloying // Journal of Alloys and Compounds, 2010, vol. 504, Suppl. 1, pp. S34-S37. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.04.065>
4. Sterkhova I. V., Lad'yanov V. I., Kamaeva L. V., Umnova N. V., Umnov P. P. On the tendency of the Co-, Ni-, and Fe-based melts to the bulk amorphization // Metallurgical and Materials Transactions A, 2016, vol. 47, no. 11, pp. 5487-5495. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11661-016-3693-2>
5. Dogan A., Arslan H. Thermodynamic description of the viscosity of liquid solder alloys with minor co impurities // Philosophical Magazine, 2019, vol. 99, pp. 267-283. <https://doi.org/10.1080/14786435.2018.1537530>
6. Gąsior W. Viscosity modeling of binary alloys: comparative studies // Calphad, 2014, vol. 44, pp. 119-128. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2013.10.007>
7. Олянина Н. В., Бельтюков А. Л., Ладьянов В. И. Вязкость расплавов системы Co-B // Расплавы. 2016. № 2. С. 165-175.
8. Олянина Н. В., Бельтюков А. Л., Ладьянов В. И. Сравнение моделей, описывающих концентрационные зависимости вязкости расплавов, на примере системы Co-Si // Химическая физика и мезоскопия. 2017. Т. 19, № 3. С. 436-447.
9. Belyukov A., Olyanina N., Ladyanov V. The viscosity of liquid Co-Si-B alloys // Journal of Molecular Liquids, 2019, vol. 281, pp. 204-215. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.02.064>
10. Козлов Л. Я., Романов Л. М., Петров Н. Н. Прогнозирование вязкости многокомпонентных металлических расплавов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1983. № 3. С. 7-11.
11. Бельтюков А. Л., Олянина Н. В., Ладьянов В. И. Особенности измерения вязкости жидких сплавов Co-Si // Расплавы. 2017. № 6. С. 470-483.
12. Швидковский Е. Г. Некоторые вопросы вязкости жидких металлов. М.: Гостехиздат, 1955. 208 с.
13. Бельтюков А. Л., Ладьянов В. И. Автоматизированная установка для определения кинематической вязкости металлических расплавов // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 2. С. 155-161.
14. Гончаров О. Ю., Олянина Н. В., Бельтюков А. Л., Ладьянов В. И. Влияние температуры и примесей в газовой фазе на состав поверхностных слоев сплавов системы Co-B // Журнал физической химии. 2015. Т. 89, № 5. С. 842-848. <https://doi.org/10.7868/S0044453715050143>
15. Бельтюков А. Л., Олянина Н. В., Ладьянов В. И. Особенности измерения вязкости металлических расплавов методом крутильных колебаний // Расплавы. 2016. № 2. С. 176-184.
16. Штернер С. Р., Довгопол С. П. Плотность, электросопротивление и ближний порядок расплавов Co-B и Ni-B // Украинський фізичний журнал. 1983. Т. 28, № 6. С. 858-861.

17. Гельд П. В., Гертман Ю. М. Плотности жидких сплавов кремния с кобальтом и никелем // Физика металлов и металловедение. 1961. Т. 12, № 1. С. 47-50.
18. Kaptay G. A new equation to estimate the concentration dependence of the viscosity of liquid metallic alloys from the heat of mixing data // Proceedings of microCAD 2003 conference, Section Metallurgy, Hungary, University of Miskolc, 2003, pp. 23-28.
19. Chhabra R. P. A simple method for estimating the viscosity of molten metallic alloys // Journal of Alloys and Compounds, 1995, vol. 221, pp. L1-L3. [https://doi.org/10.1016/0925-8388\(94\)01542-2](https://doi.org/10.1016/0925-8388(94)01542-2)
20. Sato Yu. Representation of the viscosity of molten alloy as a function of the composition and temperature // Japanese Journal of Applied Physics, 2011, vol. 50, no. 11S, 11RD01. <https://doi.org/10.1143/JJAP.50.11RD01>
21. Hirai M. Estimation of viscosities of liquid alloys // ISIJ International, 1993, vol. 33, no. 2, pp. 251-258. <http://doi.org/10.2355/isijinternational.33.251>
22. Budai I., Benkő M. Z., Kaptay G. Comparoson of different theoretical models to experimental data on viscosity of binary liquid alloys // Materials Science Forum, 2007, vol. 537-538, pp. 489-496. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.537-538.489>
23. Živković D. A new approach to estimate the viscosity of the ternary liquid alloys using the Budai-Benko-Kaptay equation // Metallurgical and Materials Transactions B, 2008, vol. 39, pp. 395-398. <https://doi.org/10.1007/s11663-008-9150-x>
24. Витусевич В. Т., Щерецкий А. А., Билецкий А. К. Энтальпии образования расплавов системы Co-Si-B // Металлы. 1990. № 4. С. 199-201.
25. Omori S., Hashimoto Ya. Partial Phase Diagram of the Ternary System Co-B-Si in the Co-rich Region // Transactions of the Japan Institute of Metals, 1977, vol. 18, pp. 347-352. <https://doi.org/10.2320/matertrans1960.18.347>
26. Смитлз К. Дж. Металлы: Справочное издание. М.: Металлургия, 1980. 447 с.
27. Дриц М. Е. Свойства элементов: Справочное издание. М.: Металлургия, 1985. 672 с.
28. Sato Y., Nishizuka T., Hara K., Yamamura T., Waseda Y. Density Measurement of Molten Silicon by a Pycnometric Method // International Journal of Thermophysics, 2000, vol. 21, pp. 1463-1471. <https://doi.org/10.1023/A:1006661511770>
29. Paradis P.-F., Ishikawa T., Yoda S. Noncontact density measurements of liquid, undercooled, and high temperature solid boron // Applied Physics Letters, 2005, vol. 86, pp. 15190. <https://doi.org/10.1063/1.1900954>
30. Sato Y., Kameda Y., Nagasawa T., Sakamoto T., Moriguchi S., Yamamura T., Waseda Y. Viscosity of molten silicon and the factors affecting measurement // Journal of Crystal Growth, 2003, vol. 249, pp. 404-415. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(02\)02153-X](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(02)02153-X)
31. Ishikawa T., Watanabe Yu., Paradis P.-F., Watanabe Ya., Kimura K. Viscosity of liquid boron // Physical Review B, 2010, vol. 81, 140201(R). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.81.140201>
32. Фиалков Ю. А. Физико-химический анализ жидких систем и растворов. Киев: Наукова думка, 1992. 245 с.
33. Bel'tyukov A. L., Lad'yanov V. I., Shishmarin A. I., Menshikova S. G. Viscosity of liquid amorphizing alloy of iron with boron and silicon // Journal of Non-Crystalline Solids, 2014, vol. 401, pp. 245-249. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnoncrsol.2014.01.048>
34. Бельтюков А. Л., Шишмарин А. И., Ладьянов В. И. Вязкость расплавов $\text{Fe}_{90}\text{B}_x\text{Si}_{(10-x)}$ // Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 53, № 2. С. 315-318. <https://doi.org/10.7868/S0040364415020064>
35. Слуховский О. И., Христенко Т. М., Лепеева Ю. В., Маслов В. В., Носенко В. К., Ильинский А. Г., Шпак А. П. Атомное строение сплавов системы Fe-Si-B в жидком состоянии // Металлофизика и новейшие технологии. 2008. Т. 30, № 7. С. 971-981.
36. Qin J. Y., Gu T. K., Yang L., Bian X. F. Study on the structural relationship between the liquid and amorphous $\text{Fe}_{78}\text{Si}_9\text{B}_{13}$ alloys by ab initio molecular dynamics simulation // Applied Physics Letters, 2007, vol. 90, 201909. <https://doi.org/10.1063/1.2737937>
37. Novakovic R., Giuranno D., Caccia M., Amore S., Nowak R., Sobczak N., Narciso J., Ricci E. Thermophysical properties of liquid Co-Si alloys // Journal of Molecular Liquids, 2016, vol. 221, pp. 346-353. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.05.084>
38. Бельтюков А. Л., Олянина Н. В., Ладьянов В. И. Температурные и концентрационные зависимости вязкости расплавов Co-Si // Теплофизика высоких температур. 2019. Т. 57, № 1. С. 47-54. <https://doi.org/10.1134/S0040364419010289>
39. Казимиров В. П., Роик А. С., Сокольский В. Э. Особенности структуры расплавов Co-Si, Co-Ge, Co-Sn // Расплавы. 2008. № 1. С. 13-21.
40. Мудрый С. И. Структура расплавов системы Co-B // Неорганические материалы. 1998. Т. 34, № 1. С. 43-44.

REFERENCES

1. Bormio-Nunes C., Nunes C. A., Coelho A. A., Faria M. I. T. S., Suzuki P. A., Coelho G. C. Magnetization studies of binary and ternary Co-rich phases of the Co-Si-B system. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, vol. 508, pp. 5-8. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.08.019>

2. Yarmoshchuk Y. I., Nakonechna O. I., Semenko M. P., Zakharenko M. I. Magnetic and transport properties of Co-Si-B metallic glasses with complex dopants. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2014, vol. 367, pp. 15-18. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.04.078>
3. Zhu C. L., Wang Q., Wang Y. M., Qiang J. B., Dong C. Co-B-Si-Ta bulk metallic glasses designed using cluster line and alloying. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, vol. 504, Supl. 1. pp. S34-S37. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.04.065>
4. Sterkhova I. V., Lad'yanov V. I., Kamaeva L. V., Umnova N. V., Umnov P. P. On the tendency of the Co-, Ni-, and Fe-based melts to the bulk amorphization // *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2016, vol. 47, no. 11, pp. 5487-5495. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11661-016-3693-2>
5. Dogan A., Arslan H. Thermodynamic description of the viscosity of liquid solder alloys with minor co impurities. *Philosophical Magazine*, 2019, vol. 99, pp. 267-283. <https://doi.org/10.1080/14786435.2018.1537530>
6. Gąsior W. Viscosity modeling of binary alloys: comparative studies. *Calphad*, 2014, vol. 44, pp. 119-128. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2013.10.007>
7. Olyanina N. V., Bel'tyukov A. L., Lad'yanov V. I. Viscosity of Co-B Melts. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2016, vol. 2016, no. 2, pp. 150-155. (In Russian). <https://doi.org/10.1134/S0036029516020105>
8. Olyanina N. V., Bel'tyukov A. L., Lad'yanov V. I. Sravneniye modeley, opisyyvayushchikh kontsentratsionnyye zavisimosti vyazkosti rasplavov, na primere sistemy Co-Si [Comparison of models, describing concentration dependences of melts viscosity on the example of the Co-Si system]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2017, vol. 19, no. 3, pp. 436-447. (In Russian).
9. Bel'tyukov A., Olyanina N., Ladiyanov V. The viscosity of liquid Co-Si-B alloys. *Journal of Molecular Liquids*, 2019, vol. 281, pp. 204-215. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.02.064>
10. Kozlov L. Ya., Romanov L. M., Petrov N. N. Prognozirovaniye vyazkosti mnogokomponentnykh metallicheskiykh rasplavov [Prediction of viscosity of multicomponent metal melts]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [Proceedings of higher educational institutions. Ferrous metallurgy], 1983, no. 3, pp. 7-11. (In Russian).
11. Bel'tyukov A. L., Olyanina N. V., Lad'yanov V. I. Osobennosti izmereniya vyazkosti zhidkikh splavov Co-Si [Peculiarities of viscosity measuring of the Co-Si melts]. *Rasplavy* [Russian metallurgy (Metally)], 2017, no. 6, pp. 470-483. (In Russian).
12. Shvidkovskiy Ye. G. *Nekotoryye voprosy vyazkosti rasplavlennykh metallov* [Some questions of the viscosity of molten metals]. Moscow: Gostekhizdat Publ., 1955. 208 p.
13. Bel'tyukov A. L., Lad'yanov V. I. An automated setup for determining the kinematic viscosity of metal melts. *Instruments and Experimental Techniques*, 2008, vol. 51, no. 2, pp. 304-310. (In Russian). <https://doi.org/10.1134/S0020441208020279>
14. Goncharov O. Yu., Olyanina N. V., Bel'tyukov A. L., Lad'yanov V. I. Effects of temperature and gas phase impurities on the composition of Co-B alloy surface layers. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2015, vol. 89, no. 5, pp. 857-863. (In Russian). <https://doi.org/10.1134/S0036024415050143>
15. Bel'tyukov A. L., Olyanina N. V., Lad'yanov V. I. Torsional vibration measurement of the viscosity of a metallic melt. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2016, vol. 2016, no. 2, pp. 156-161. (In Russian). <https://doi.org/10.1134/S0036029516020026>
16. Shterner S. R., Dovgopol S. P. Plotnost', elektrosoprotivleniye i blizhniy poryadok rasplavov Co-B i Ni-B [Density, electrical resistance, and short-range order of Co-B and Ni-B melts] *Ukrainskiy fizicheskii zhurnal* [Ukrainian Journal of Physical], 1983, vol. 28, no. 6, pp. 858-861. (In Ukraine).
17. Gel'd P. V., Gertman Yu. M. Plotnosti zhidkikh splavov kremniya s kobal'tom i nikel'm [Density of liquid alloys of silicon with cobalt and nickel]. *Fizika metallov i metallovedenie* [Physics of metals and metallography], 1961, vol. 12, no. 1, pp. 47-50. (In Russian).
18. Kaptay G. A new equation to estimate the concentration dependence of the viscosity of liquid metallic alloys from the heat of mixing data. *Proceedings of microCAD 2003 conference*, Section Metallurgy, Hungary, University of Miskolc, 2003, pp. 23-28.
19. Chhabra R. P. A simple method for estimating the viscosity of molten metallic alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 1995, vol. 221, L1-L3. [https://doi.org/10.1016/0925-8388\(94\)01542-2](https://doi.org/10.1016/0925-8388(94)01542-2)
20. Sato Yu. Representation of the viscosity of molten alloy as a function of the composition and temperature. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2011, vol. 50, no. 11S, 11RD01. <https://doi.org/10.1143/JJAP.50.11RD01>
21. Hirai M. Estimation of viscosities of liquid alloys. *ISIJ International*, 1993, vol. 33, no. 2, pp. 251-258. <http://doi.org/10.2355/isijinternational.33.251>
22. Budai I., Benkő M. Z., Kaptay G. Comparoson of different theoretical models to experimental data on viscosity of binary liquid alloys. *Materials Science Forum*, 2007, vol. 537-538, pp. 489-496. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.537-538.489>
23. Živković D. A new approach to estimate the viscosity of the ternary liquid alloys using the Budai-Benko-Kaptay equation // *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2008, vol. 39, pp. 395-398. <https://doi.org/10.1007/s11663-008-9150-x>
24. Witusewicz V. T., Stsheretski A. A., Biletski A. K. Ental'pii obrazovaniya rasplavov sistemy Co-Si-B [Enthalpies of formation of melts of the Co-Si-B system]. *Metally* [Metals], 1990, no. 4, pp. 199-201. (in Russian).

25. Omori S., Hashimoto Ya. Partial Phase Diagram of the Ternary System Co-B-Si in the Co-rich Region. *Transactions of the Japan Institute of Metals*, 1977, vol. 18, pp. 347-352. <https://doi.org/10.2320/matertrans1960.18.347>
26. Smithells C. J. *Metally: Spravochnoye izdaniye* [Metals: Reference book]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1980. 447 p.
27. Drits M. E. *Svoystva elementov: Spravochnoye izdaniye* [Properties of Elements: Reference Book]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1985. 672 c.
28. Sato Y., Nishizuka T., Hara K., Yamamura T., Waseda Y. Density Measurement of Molten Silicon by a Pycnometric Method. *International Journal of Thermophysics*, 2000, vol. 21, pp. 1463-1471. <https://doi.org/10.1023/A:1006661511770>
29. Paradis P.-F., Ishikawa T., Yoda S. Noncontact density measurements of liquid, undercooled, and high temperature solid boron. *Applied Physics Letters*, 2005, vol. 86, pp. 15190. <https://doi.org/10.1063/1.1900954>
30. Sato Y., Kameda Y., Nagasawa T., Sakamoto T., Moriguchi S., Yamamura T., Waseda Y. Viscosity of molten silicon and the factors affecting measurement. *Journal of Crystal Growth*, 2003, vol. 249, pp. 404-415. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(02\)02153-X](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(02)02153-X)
31. Ishikawa T., Watanabe Yu., Paradis P.-F., Watanabe Ya., Kimura K. Viscosity of liquid boron. *Physical Review B*, 2010, vol. 81, 140201(R). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.81.140201>
32. Fialkov Yu. A. Fiziko-khimicheskiy analiz zhidkikh sistem i rastvorov [Physicochemical analysis of liquid systems and solutions]. Kiev: Naukova Dumka Publ., 1992. 245 p.
33. Bel'tyukov A. L., Lad'yanov V. I., Shishmarin A. I., Menshikova S. G. Viscosity of liquid amorphizing alloy of iron with boron and silicon. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2014, vol. 401, pp. 245-249. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2014.01.048>
34. Bel'tyukov A. L., Shishmarin A. I., Lad'yanov V. I. Viscosity of $\text{Fe}_{90}\text{B}_x\text{Si}_{(10-x)}$ Melts. *High Temperature*, 2015, vol. 53, no. 2, pp. 302-304. (In Russian). <https://doi.org/10.1134/S0018151X15020066>
35. Slukhovskiy O. I., Khristenko T. M., Lepeyeva Yu. V., Maslov V. V., Nosenko V. K., Il'inskiy A. G., Shpak A. P. Atomnoye stroeniye splavov sistema Fe-Si-B v zhidkom sostoyanii [Atomic structure of alloys of the Fe-Si-B system in a liquid state]. *Metallofizika i noveyskiye tekhnologii* [Metal physics and the latest technologies], 2008, vol. 30, no. 7, pp. 971-981. (In Ukraine).
36. Qin J. Y., Gu T. K., Yang L., Bian X. F. Study on the structural relationship between the liquid and amorphous $\text{Fe}_{78}\text{Si}_9\text{B}_{13}$ alloys by ab initio molecular dynamics simulation. *Applied Physics Letters*, 2007, vol. 90, 201909. <https://doi.org/10.1063/1.2737937>
37. Novakovic R., Giuranno D., Caccia M., Amore S., Nowak R., Sobczak N., Narciso J., Ricci E. Thermophysical properties of liquid Co-Si alloys. *Journal of Molecular Liquids*, 2016, vol. 221, pp. 346-353. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.05.084>
38. Beltyukov A. L., Olyanina N. V., Ladyanov V. I. Dependences of Co-Si Melt Viscosity on Temperature and Concentration. *High Temperature*, 2019, vol. 57, no. 1, pp. 41-48. (In Russian). <https://doi.org/10.1134/S0018151X18060068>
39. Kazimirov V. P., Roik A. S., Sokol'skii V. E. Structural Features of Co-Si, Co-Ge, and Co-Sn Binary Melts. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2010, vol. 2010, no. 2, pp. 77-83. (In Russian). <https://doi.org/10.1134/S0036029510020011>
40. Mudryi S. I. Structure of Co-B Melts. *Inorganic Materials*, 1998, vol. 34, no. 1, pp. 34-35. (In Russian).

Поступила 03.11.2021; после доработки 15.11.2021; принята к опубликованию 18.11.2021
Received 03 November 2021; received in revised form 15 November 2021; accepted 18 November 2021

Бельтюков Анатолий Леонидович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Российская Федерация, e-mail: albeltyukov@udman.ru

Anatoly L. Beltyukov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation

Олянина Наталья Владимировна, научный сотрудник, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Российская Федерация, e-mail: oljanina@mail.ru

Natalia V. Olyanina, Researcher, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation

Ладьянов Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, руководитель Научного центра Металлургической физики и материаловедения, главный научный сотрудник, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Российская Федерация, e-mail: vilad@udman.ru

Vladimir I. Ladyanov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Scientific Center for Metallurgical Physics and Materials Science, Chief Researcher, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation