
УДК 538.931:54-143:546.657

ВЯЗКОСТЬ РАСПЛАВОВ Nd и Fe–30% Nd–1% В–1% Со–1% Dy

© 2020 г. И. В. Слинкин^а, О. А. Чикова^{а, *}, В. В. Вьюхин^а

^аФГАОУ ВО “Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина”,
Екатеринбург, Россия

*e-mail: chik63@mail.ru

Поступила в редакцию 18.01.2020 г.

После доработки 11.02.2020 г.

Принята к публикации 18.02.2020 г.

Неодим является одним из наиболее широко применяемых редкоземельных металлов, основное количество неодима используют для изготовления постоянных магнитов. Представлены экспериментальные данные о физико-химических свойствах неодима и сплава Fe–30% Nd–1% В–1% Со–1% Dy в жидком состоянии. Изначально при производстве магнитов NdFeB готовится слиток Fe–30% Nd–1% В–1% Со–1% Dy. Измерена кинематическая вязкость и удельное электросопротивление жидкого неодима Nd (99.85%) и кинематическая вязкость расплава Fe–30% Nd–1% В–1% Со–1% Dy. Зависимость кинематической вязкости расплава неодима от температуры описывается уравнением Аррениуса–Френкеля–Эйринга и согласуется с результатами теоретического расчета. Температурная зависимость кинематической вязкости расплава Fe–30% Nd–1% В–1% Со–1% Dy имеет аномальный характер в температурном интервале от 1320 до 1550°С – вязкость увеличивается с ростом температуры. Возрастание вязкости с ростом температуры, так называемое “квазигазовое” поведение расплава, авторами описывается в рамках представлений физической химии с применением понятия молярной вязкости. Зависимость удельного электросопротивления жидкого неодима от температуры описывается линейным уравнением. Измеренные значения удельного электросопротивления расплава неодима на 30% выше опытных данных, полученных другими исследователями. Результаты измерений планируется использовать в интересах оптимизации параметров металлургического производства спеченных постоянных магнитов Ural Strip Casting NdFeB.

Ключевые слова: неодим, сплав Fe–30% Nd–1% В–1% Со–1% Dy, расплав, вязкость, удельное электросопротивление

DOI: 10.31857/S0235010620030093

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее широко применяемых редкоземельных металлов (РЗМ) является неодим (потребление более 20 тыс. т./год, третья позиция после церия и лантана), основное количество неодима используют для изготовления постоянных магнитов. Экспериментальные данные по физическим и химическим свойствам РЗМ постоянно расширяются и уточняются по мере освоения новых методов исследования [1, 2], но остается дефицит экспериментальных данных о свойствах РЗМ в жидком состоянии [3]. Получение экспериментальных данных о физико-химических свойствах расплавов РЗМ сопряжено с существенными экспериментальными трудностями, но актуально для практики металлургического производства. Магниты NdFeB превосходят другие магнитные материалы по величине магнитной энергии на единицу объема и по величине коэрцитивной силы. Изначально при производстве магнитов NdFeB готовится слиток в стехиометрическом соотношении Nd₂Fe₁₄B, что соответствует составу сплава

по массе, %: 25–32Nd; 65–73Fe; ~1.0 В. Большинство научно-исследовательских работ в области магнитных материалов направлено на изучение их магнитных свойств, микроструктуры в твердом состоянии, в то время как данных о литейных свойствах (например, вязкости) в жидком состоянии, актуальных для практики металлургического производства, практически нет. Если в литературе имеются данные о температурных зависимостях плотности и поверхностного натяжения [4–9], вязкости [3, 10–12] и удельного электросопротивления [9, 13–16] жидкого неодима, то данные о вязкости жидкого сплава Fe–30% Nd–1% В–1% Co–1% Dy практически отсутствуют [17–20]. Знание закономерностей изменения вязкости жидкого сплава Nd₂Fe₁₄В в литейных агрегатах особенно актуальны для популярной технологии “Strip Cast” [19, 20]. Данные о вязкости жидкого неодима [3, 10–12] получены только расчетным путем. Авторы [15] измерили удельное электрическое сопротивление жидкого неодима при температуре плавления – 154 мкОм · см; и определили значение $\frac{d\rho}{dT} = 0.023 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \cdot \text{К}^{-1}$.

Авторы [16] зафиксировали значение $\frac{d\rho}{dT} = 0.012 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \cdot \text{К}^{-1}$. Авторы [6] измерили плотность жидкого неодима при $T_{\text{пл}} = 1292 \text{ К}$ и получили значение 6507 кг/м^3 при температурном коэффициенте $\alpha = -0.3565 \text{ кг/(м}^3 \cdot \text{К)}$. Авторы [7] измерили плотность жидкого неодима при $T_{\text{пл}} = 1292 \text{ К}$ и получили значение 6688 кг/м^3 при температурном коэффициенте $\alpha = -0.528 \text{ кг/(м}^3 \cdot \text{К)}$. Постовалов В.Г. приводит расчетную зависимость для динамической вязкости жидкого неодима $\mu = 6.504 \cdot 10^{-4} \cdot e^{\frac{2071}{T}} \text{ Па} \cdot \text{с}$ [12]. В монографии П.С. Попеля для жидкого неодима поверхностное натяжение вблизи точки плавления 688 мДж/м и температурный коэффициент – 0.5 мДж/мК [5]. В работах Кононенко В.И. приводятся различные данные о величине поверхностного натяжения жидкого самария при $T_{\text{пл}} - 0.931 \text{ Н/м}$ [8] и 0.685 Н/м [4]. Постовалов В.Г. для динамической вязкости жидкого неодима при $T_{\text{пл}}$ получил значение $\mu = 3.23 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$, что значительно выше значения полученного авторами [3] по соотношению между вязкостью и поверхностным натяжением $\frac{\mu}{\sigma} = \frac{16}{15} \sqrt{\frac{M}{kT}}$ [21] – $\mu = 1.688 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$. Таким образом, наиболее актуальным является получение экспериментальных данных о вязкости расплавов неодима и Fe–30% Nd–1% В–1% Co–1% Dy.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Основной проблемой при экспериментальном определении физико-химических характеристик жидких РЗМ, является оптимальный подбор материала измерительной ячейки. Традиционно для жидких РЗМ используются тигли из W, Mo и Ta, что вносит дополнительные трудности в определение таких характеристик, как вязкость и удельное электросопротивление. В случае измерения вязкости традиционным методом Швидковского это ведет к утяжелению подвесной системы и, как следствие, к снижению чувствительности; при измерении удельного электросопротивления возникает необходимость учета электросопротивления измерительной ячейки, вклад которого соизмерим с сопротивлением самого образца. Авторы данной работы использовали керамические тигли ZrO₂ при определении физико-химических характеристик расплава неодима и жидкого сплава Fe–30% Nd–1% В–1% Co–1% Dy.

Измерены температурные зависимости кинематической вязкости жидкого неодима с содержанием основного компонента не менее 99.9% и жидкого сплава Fe–30% Nd–1% В–1% Co–1% Dy. Кинематическую вязкость расплавов измеряли методом затуха-

ющих крутильных колебаний тигля с расплавом в одноторцовом варианте при отношении высоты образца к его диаметру $h/d \approx 1$ в режиме изотермических выдержек 20 мин, со ступенчатыми изменениями температуры – 20°C. Опыты проводили в атмосфере высокочистого гелия под давлением 10^5 Па. Температуру поддерживали на заданном уровне с точностью 1°C с помощью высокоточного регулятора. При проведении измерений регистрацию параметров колебаний осуществляли оптическим способом с помощью системы фоторегистрации колебаний. Методика измерений кинематической вязкости расплавов ранее подробно описана в работе [22]. Систематическая погрешность измерения ν составляла 3%, а случайная погрешность, определяющая разброс точек в ходе одного опыта, при доверительной вероятности $p = 0.95$ не превышала 1.5%.

Измерена температурная зависимость удельного электросопротивления жидкого неодима с содержанием основного компонента не менее 99.9%. Удельное электросопротивление ρ измеряли по углу закручивания контейнера с исследуемым образцом, подвешенным на упругой нити, под действием вращающего магнитного поля – методом Регеля. Метод Регеля – бесконтактный метод измерения, в его основе лежит предположение о том, что угол закручивания подвесной системы ϕ пропорционален удельной проводимости металла, если радиус цилиндрического образца соизмерим с высотой [23]. Измерение удельного электросопротивления проведены в интервале температур 1020–1350°C в режиме нагрева охлаждения образца с шагом 30–40°C. Рабочую камеру предварительно вакуумировали до 0.001 Па. Затем запускали гелий до давления $\sim 10^5$ Па. Измерения удельного электросопротивления проводили на оригинальной установке, описанной в работе [24]. Систематическая погрешность измерения ρ составляла 3%, а случайная погрешность, определяющая разброс точек в ходе одного опыта, при доверительной вероятности $p = 0.95$ не превышала 1.5%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерения кинематической вязкости расплавов Nd 99.9% и Fe–30% Nd–1% В–1% Со–1% Ду представлены на рис. 1. Зависимость кинематической вязкости расплава неодима удовлетворительно описывается уравнением Аррениуса–Френкеля–Эйринга (АФЭ): $\nu = A \exp(\epsilon/kT)$ [25], где k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура. Измеренные значения кинематической вязкости расплава неодима на 5–8% выше расчетных данных [12], значения энтропийного множителя A и энергии активации вязкого течения ϵ в уравнении АФЭ также незначительно отличаются от данных теоретического расчета [12]. Для расплава Fe–30% Nd–1% В–1% Со–1% Ду обнаружен аномальный ход температурной зависимости кинематической вязкости $\nu(t)$: в температурном интервале от 1320 до 1550°C вязкость увеличивается с ростом температуры. Известно что, при температурах выше 1350°C начинается взаимодействие расплава неодима с материалом тигля с образованием термически устойчивых химических соединений типа цирконата неодима [26]. Возможно, возрастание вязкости с ростом температуры жидкого сплава Fe–30% Nd–1% В–1% Со–1% Ду также связан с химсоставом образца, в том числе с формированием структурных составляющих в исследованном температурном диапазоне в сплаве.

Фазовые диаграммы оксидов лантаноидов и диоксида циркония (материал тигля) хорошо изучены. Фазовая диаграмма двойной системы ZrO_2 – Nd_2O_3 изучена в работе [26], в системе присутствует соединение цирконат неодима $Nd_2Zr_2O_7$. Фазовая диаграмма $Dy_2O_3 \cdot 2ZrO_2$ изучена в работе [27]. Считается, что в системе присутствует соединение $Dy_5Zr_2O_{11.5}$ [28]. Реакции фазовых превращений, основанные на диаграмме состояния системы Nd–Fe–В [29], при получении сплавов NdFeВ представлены следующим образом: $Fe + Fe_2B + Nd \rightarrow Fe + NdFe_4B_4 + Nd \rightarrow Nd_2Fe_{14}B + Nd$.

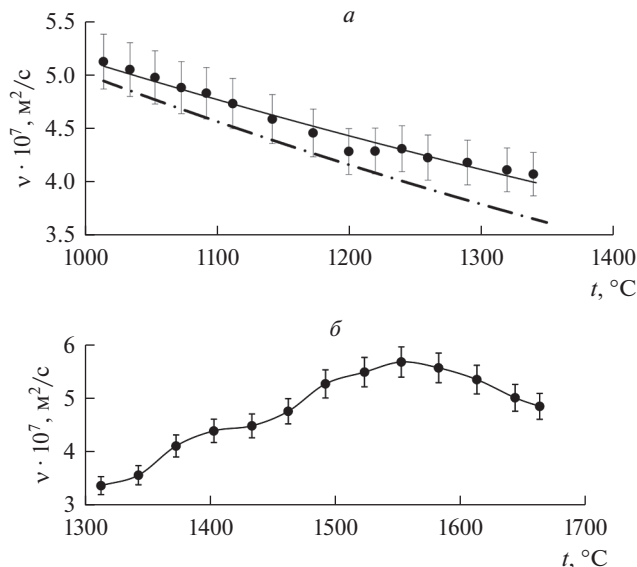


Рис. 1. Зависимость кинематической вязкости расплава от температуры: *a* – жидкий неодим Nd (99.9%) (● – экспериментальные данные авторов; - - - - - расчетные данные работы [12]), *б* – жидкий сплав Fe–30% Nd–1% B–1% Co–1% Dy.

EDS-анализ поверхности спеченных магнитов Nd(Dy)FeB показал, что микроструктура в основном представлена кристаллитами соединения $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, по границам присутствует небольшой избыток Nd, который связан с кислородом и образует оксид Nd_2O_3 . На поверхности образцов после опытов по измерению вязкости также обнаружены желтые кристаллы трикарбида неодима Nd_2C_3 .

Аномальный ход политермы кинематической вязкости (возрастание вязкости с ростом температуры), так называемое “квазигазовое” поведение расплава авторами описывается в рамках представлений физической химии с применением понятия молярной вязкости. Молярная вязкость представляет собой произведение динамической вязкости η на мольный объем или кинематической вязкости ν на молярную массу M : $\eta_m = \eta V_m = \nu M$. Молярная вязкость – это сдвиговая вязкость одного моля жидкофазной системы при изменении ее параметров состояния. Обратная молярной вязкости величина – это молярная текучесть. Ранее показана принципиальная возможность описания температурной зависимости вязкости жидких металлов с использованием мольного подхода в процессе переноса импульса, понятия молярной вязкости [30]. Относительная величина молярной текучести F_m в широком интервале температур является линейной функцией “свободного” мольного объема жидкой среды: $\frac{F_m - F_0}{F_0} = f\left(\frac{V - V_0}{V_0}\right)$, где $F_0 = F_m$ при $V - V_0 = V_0$ – представляет собой предельную текучесть. V_0 – предельный объем, определяемый соотношением $V_0 = \lim_{F_m \rightarrow 0} V$. Величина предельного объема V_0 есть мольный объем плотной упаковки молекул вещества при фиксированной температуре T_0 , при которой свободный объем близок к минимальному значению, в качестве таковой обычно принимают или температуру плавления вещества. Результирующий поток импульса в металлических расплавах можно предста-

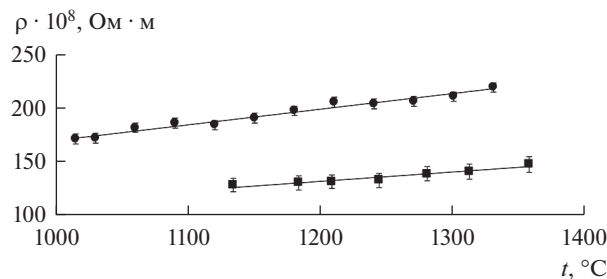


Рис. 2. Зависимость удельного электросопротивления жидкого неодима Nd(99.9%) от температуры (● – экспериментальные данные авторов; ■ – экспериментальные данные работы [13]).

вить в виде двух вкладов, соответствующих двум различным механизмам трения: жидкости и газа и относительное изменение молярной текучести жидких металлов есть равнодействующая двух составляющих: $\frac{F_m - F_0}{F_0} = \left[\frac{F_m - F_0}{F_0} \right]_{\text{ж}} + \left[\frac{F_m - F_0}{F_0} \right]_{\text{г}}$, где первое слагаемое в правой части уравнения относится к жидкому, а второе – к газообразному вкладу в вязкое течение жидких металлов. Для расчета “квазигазовой” составляющей вязкости жидких металлов используют кинетическую теорию газов [30]:

$$\eta^* = \frac{1}{F^*} = \left(\frac{1}{\pi \sigma^2} \right) \left(\frac{k T m}{\pi} \right)^{1/2}, \text{ где } \sigma - \text{ диаметр твердой сферы, } m - \text{ масса, } T - \text{ температура;}$$

или, используя уравнение, предложенное Гильдебрандом [30]: $\eta^* = \frac{1}{F^*} = K \left(\frac{T m}{V^{2/3}} \right)^{1/2}$,

где K – константа. Таким образом, строение жидких металлов является промежуточным между кристаллическим и газообразным, для жидкости характерно наличие как поступательного, так и колебательного видов движения ее частиц, вклад первого отражает сходство жидкости с газом и позволяет возникновение внутреннего трения в жидкости объяснить его так же, как в газах. Если вязкость жидкостей определяется, прежде всего, межмолекулярными силами, зависящими от расстояний между молекулами, тогда вязкость можно рассматривать как результат переноса импульса молекулами, упорядоченно движущимися в имеющемся “свободном” пространстве в соответствии с уравнением АФЭ, где энтропийный множитель A может быть представлен в виде зависимости от ν объема на единицу структуры расплава (ион, атом или кластер): $A = h/\nu \cdot \rho$, где h – постоянная Планка, ρ – плотность расплава.

Результаты измерения удельного электросопротивления расплава Nd 99.9% представлены на рис. 2. Зависимость удельного электросопротивления расплава неодима от температуры удовлетворительно описывается линейным уравнением. Измеренные значения удельного электросопротивления расплава неодима на 30% выше опытных данных [13], значение температурного коэффициента сопротивления dp/dT также значительно отличаются от данных [13] – данные авторов в два раза выше. Если значения температурного коэффициента удельного сопротивления расплава dp/dT выше, то согласно представлениям Нагела и Таука [31] это свидетельствует о меньшем по величине объеме ν , приходящемся на структурную единицу расплава, что согласуется с результатами измерения вязкости расплава.

ВЫВОДЫ

1. Методом затухающих крутильных колебаний тигля измерена кинематическая вязкость расплавов Nd 99.9% и Fe–30% Nd–1% В–1% Со–1% Dy. Измерения проведены в инертной атмосфере в режиме нагрева. Измерения вязкости жидкого неодима проведены впервые. Опытным путем показано, что наиболее пригодны для экспериментов тигли из ZrO_2 . Зависимость кинематической вязкости расплава неодима от температуры удовлетворительно описывается уравнением Аррениуса–Френкеля–Эйринга (АФЭ) и согласуется с результатами теоретического расчета [12]. Температурная зависимость кинематической вязкости расплава Fe–30% Nd–1% В–1% Со–1% Dy имеет аномальный характер в температурном интервале от 1320 до 1550°C – вязкость увеличивается с ростом температуры. Возрастание вязкости с ростом температуры, так называемое “квазигазовое” поведение расплава, авторами описывается в рамках представлений физической химии с применением понятия молярной вязкости.

2. Методом вращающего магнитного поля измерена температурная зависимость удельного электросопротивления ρ расплава Nd 99.9%. Зависимость удельного электросопротивления расплава неодима от температуры удовлетворительно описывается линейным уравнением. Измеренные значения удельного электросопротивления расплава неодима значительно выше литературных данных [13], значение температурного коэффициента сопротивления $d\rho/dT$ также значительно отличаются от литературных данных [13] – данные авторов в два раза выше.

3. Результаты исследования также могут быть использованы как справочные данные и будут востребованы при разработке режимов литья технически важных сплавов Fe–30% Nd–1% В–1% Со–1% Dy, в производстве спеченных редкоземельных магнитов NdFeB.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дрица М.Е. Свойства элементов: Справ. изд. М.: Издательский дом “Руда и металлы”. 2003.
2. Савицкий Е.М., Терехова В.Ф., Наумкин О.П. Физико-химические свойства редкоземельных металлов, скандия и иттрия // УФН. 1963. **LXXIX**. № 2. С. 263–293.
3. Киселев А.И., Кононенко В.И. Теплофизические свойства расплавов редкоземельных металлов: численные оценки. Екатеринбург: УрО РАН, 2003.
4. Kononenko V.I., Sukhman A.L., Gruverman, S.L., Torokin V.V. Density and surface tension of liquid rare earth metals, scandium and Yttrium // Phys. Stat. Sol.(a). 1984. **84**. P. 423–432.
5. Попель С.И. Поверхностные явления в расплавах. М.: Металлургия. 1994.
6. Khaifulin R.A., Stankus S.V. Change in the Praseodymium and Neodymium Density at Crystallization from Liquid State, in Thermal Physics of Crystallization of Substances and Materials. Inst. Teor. Fiz., Sib. Otd. Akad. Nauk SSSR, Novosibirsk. 1987. P. 143–154.
7. Rohr W.G. The Liquid Densities of Cerium and Neodymium Metals // J. Less-Common Met. 1966. **10**. № 6. P. 389–391.
8. Безукладникова Л.Л., Кононенко В.И. Поверхностные и объемные свойства лантаноидов. Металлы. 1994. № 5. С. 117–120.
9. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Справ. изд. М.: Металлургия. 1989.
10. Кононенко В.И., Киселев А.И., Латош И.Н. Расчет кинетических характеристик жидких редкоземельных металлов. Металлофизика. 1986. **8**. № 2. С. 2–23.
11. Postovalov V.G., Romanov E.P., Kondrat'ev V.P., Kononenko V.I. Theory of Transport in Liquid Metals: Calculation of Dynamic Viscosity // High Temp. 2003. **41**. № 6. P. 762–770.
12. Kondrat'ev V.P., Romanov E.P., Postovalov V.G. Kinetic properties of light lanthanide melts // J. Physics: Conference Series. 2008. **98**. Art.062020.
13. Банчила С.Н., Филиппов Л.Н. Изучение электропроводности жидких металлов // Теплофизика высоких температур. 1973. **11**. № 6. С. 1301–1305.
14. Postovalov V.G., Romanov E.P., Kondrat'ev V. P. Structural Characteristics and the Temperature Derivative of the Electrical Resistivity of Liquid Lanthanides // The Physics of Metals and Metallography. 2007. **103**. № 3. P. 234–245.
15. Hiemstra C., Keegstra P., Masselink W.I., Van Zytveld J.B. Electrical Resistivity of Solid and Liquid Pr, Nd and Sm // J. Physics F: Metal Physics J. 1984. **14**. № 8. P. 1867–1875.

16. Güntherodt H.I., Hauser E., Künzi H.U. Electrical Resistivity of Liquid Rare-Earth Metals and Their Alloys, in Liquid Metals // Third International Conference on Liquid Metals, Bristol. 1976. P. 324–336.
17. Ozawa S., Saito T., Yu J. et al. Solidification behavior in undercooled Nd–Fe–B alloys // Journal of alloys and compounds. 2001. **322**. № 1–2. P. 276–280.
18. Kramer M.J., Lewis L.H., Fabiatti L.M., Tang Y., Miller W., Dennis K.W., Mc Callum R.W. Solidification, microstructural refinement and magnetism in Nd₂Fe₁₄B // Journal of magnetism and magnetic materials. 2002. **241**. № 1. P. 144–155.
19. Hattori T., Fukamachi N., Goto R., Tezuka N., Sugimoto S. Microstructural Evaluation of Nd–Fe–B Strip Cast Alloys // Materials transactions. 2009. **50**. № 3. P. 479–482
20. Vasilenko D.Yu., Shitov A.V., Vlasyuga A.V., Popov A.G., Kudrevatykh N.V., Pechishcheva N.V. Microstructure and Properties of Nd–Fe–B Alloys Produced by Strip Casting and of Permanent Magnets Fabricated from Them // Metal science and heat treatment. 2015. **56**. № 11–12. P. 585–590.
21. Есин О.А., Гельчинский Б.Р., Ватолин Н.А. и др. О связи между вязкостью и поверхностным натяжением в простых жидкостях // ЖФХ. 1975. **49**. № 11. С. 2955–2957.
22. Тягунов Г.В., Цепелев В.С., Кушнин М.Н., Яковлев Г.Н. Установка для измерения кинематической вязкости металлических расплавов // Заводская лаборатория. 1980. № 10. С. 919–920.
23. Рябина А.В., Кононенко В.И., Ражабов А.А. Безэлектродный метод измерения электросопротивления металлов в твердом и жидком состояниях и установка для его реализации // Расплавы. 2009. № 1. С. 34–42.
24. Тягунов Г.В., Баум Б.А., Цепелев В.С., Тягунов А.Г., Влох А.Н. Измерение удельного электрического сопротивления методом вращающегося магнитного поля // Заводская лаборатория. 2003. **69**. № 2. С. 36–38.
25. Островский О.И., Григорян В.А., Вишкарев А.Ф. Свойства металлических расплавов. М.: Металлургия, 1988.
26. Andrievskaya, E.R. Phase equilibria in the refractory oxide of zirconia, hafnia and yttria with rare-earth oxides // J. European Ceram. Soc. 2008. **28**. P. 2363–2388.
27. Rouanet, A. Rev. Int. Hautes Temp. Refract. 1971. **8**. P. 161.
28. Van Dijk M.P., de Vries K.J., Burgraaf A.J. Oxygen ion and mixed conductivity in compounds with the fluorite and pyrochlore structure // Solid State Ionics. 1983. **9–10**. P. 913–920.
29. Matsuura, Yutaka, Phase Diagram of the Nd–Fe–B Ternary System // Japanese J. Applied Physics. 1985. **24**. № 8. P. 635–637.
30. Тюнина Е.Ю. Молярная вязкость жидких металлов в интервале 300–4000 К // Журн. физической химии. 2014. **88**. № 4. С. 557–563.
31. Nagel S.R., Tauc J. Nearly-Free-Electron Approach to the Theory of Metallic Glass Alloys // Physical Review Letters. 1975. **35**. № 6. P. 380–383.

THE VISCOSITY OF MELTS OF Nd AND Fe–30% Nd–1% B–1% Co–1% Dy

I. V. Slinkin¹, O. A. Chikova¹, V. V. Vyukhin¹

¹Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

Neodymium is one of the most widely used rare earth metals, the main amount of neodymium is used for the manufacture of permanent magnets. Experimental data on the physico-chemical properties of neodymium and Fe–30% Nd–1% B–1% Co–1% Dy in the liquid state are presented. Initially, in the production of NdFeB magnets, an ingot Fe–30% Nd–1% B–1% Co–1% Dy is prepared. The kinematic viscosity and resistivity of liquid neodymium Nd (99.85%) and kinematic viscosity of the melt Fe–30% Nd–1% B–1% Co–1% Dy were measured. The dependence of the kinematic viscosity of the neodymium melt on the temperature is described by the Arrhenius–Frenkel–Eyring equation and is consistent with the results of the theoretical calculation. The temperature dependence of the kinematic viscosity of the melt Fe–30% Nd–1% B–1% Co–1% Dy is anomalous in the temperature range from 1320 to 1550°C–viscosity increases with temperature. The authors describe the increase in viscosity with temperature, the so-called “quasi-gas” behavior of the melt, within the framework of physical chemistry concepts using the concept of molar viscosity. The dependence of the resistivity of liquid neodymium on the temperature is described by a linear equation. The measured resistivity of the neodymium melt is 30% higher than the experimental data obtained by other researchers. The results of measurements will be used to opti-

mize the parameters of metallurgical production of sintered permanent magnets Ural Strip Casting NdFeB.

Keywords: neodymium, alloy Fe–30% Nd–1% B–1% Co–1% Dy, melt, viscosity, resistivity

REFERENCES

1. Drica M.E. Svoystva elementov: Sprav. izd. [Item Properties]. M.: Izdatel'skij dom "Ruda i metal'y". 2003. [In Russian].
2. Savickij E.M., Terekhova V.F., Naumkin O.P. Fiziko-himicheskie svoystva redkozemel'nyh metall-ov, skandiya i itriya [Physical and chemical properties of rare-earth metals, scandium and yttrium] // UFN. 1963. LXXIX. № 2. P. 263–293. [In Russian].
3. Kiselev A.I., Kononenko V.I. Teplofizicheskie svoystva rasplavov redkozemel'nyh metallov: chis-lennye ocenki [Thermophysical properties of rare-earth metal melts: numerical estimates]. Yekaterinburg: UrO RAN, 2003. [In Russian].
4. Kononenko V.I., Sukhman A.L., Gruverman, S.L. Torokin V.V. Density and surface tension of liq-uid rare earth metals, scandium and Yttrium // Phys. Stat. Sol.(a). 1984. **84**. P. 423–432.
5. Popel' S.I. Poverhnostnye yavleniya v rasplavah [Surface phenomena in melts]. M.: Metallurgiya. 1994. [In Russian].
6. Khairulin R.A., Stankus S.V. Change in the Praseodymium and Neodymium Density at Crystalliza-tion from Liquid State, in Thermal Physics of Crystallization of Substances and Materials. Inst. Teor. Fiz., Sib. Otd. Akad. Nauk SSSR, Novosibirsk. 1987. P. 143–154.
7. Rohr W.G. The Liquid Densities of Cerium and Neodymium Metals // J. Less-Common Met. 1966. **10**. № 6. P. 389–391.
8. Bezukladnikova L.L., Kononenko V.I. Poverhnostnye i ob'emnye svoystva lantanoidov [Surface and bulk properties of lanthanides] // Metally. 1994. № 5. P. 117–120. [In Russian].
9. Zinov'ev V.E. Teplofizicheskie svoystva metallov pri vysokih temperaturah. Sprav. izd. [Thermo-physical properties of metals at high temperatures]. M.: Metallurgiya. 1989. [In Russian].
10. Kononenko V.I., Kiselev A.I., Latosh I.N. Raschet kineticheskikh harakteristik zhidkikh redkoze-mel'nyh metallov [Calculation of the kinetic characteristics of liquid rare earth metals] // Metallofizika. 1986. **8**. № 2. P. 2–23. [In Russian].
11. Postovalov V.G., Romanov E.P., Kondrat'ev V.P., Kononenko V. I. Theory of Transport in Liquid Metals: Calculation of Dynamic Viscosity // High Temp. 2003. **41**. № 6. P. 762–770.
12. Kondrat'ev V.P., Romanov E.P., Postovalov V.G. Kinetic properties of light lanthanide melts // J. Physics: Conference Series. 2008. **98**. Art. 062020.
13. Banchilla S.N., Filippov L.N. Izuchenie elektroprovodnosti zhidkikh metallov [tudying the electri-cal conductivity of liquid metals] // Teplofizika vysokih temperatur. 1973. **11**. № 6. P. 1301–1305. [In Russian].
14. Postovalov V.G., Romanov E.P., Kondrat'ev V. P. Structural Characteristics and the Temperature Derivative of the Electrical Resistivity of Liquid Lanthanides // The Physics of Metals and Metal-lography. 2007. **103**. № 3. P. 234–245.
15. Hiemstra C., Keegstra P., Masselink W. I., Van Zytveld J. B. Electrical Resistivity of Solid and Liq-uid Pr, Nd and Sm // J. Physics F: Metal Physics J. 1984. **14**. № 8. P. 1867–1875.
16. Güntherodt H.I., Hauser E., Künzi H.U. Electrical Resistivity of Liquid Rare-Earth Metals and Their Alloys, in Liquid Metals // Third International Conference on Liquid Metals, Bristol. 1976. P. 324–336.
17. Ozawa S., Saito T., Yu J. et al. Solidification behavior in undercooled Nd-Fe-B alloys // Journal of alloys and compounds. 2001. **322**. № 1–2. P. 276–280.
18. Kramer M.J., Lewis L.H., Fabietti L.M., Tang Y., Miller W., Dennis K.W., Mc Callum R.W. Sol-idification, microstructural refinement and magnetism in Nd₂Fe₁₄B // J. Magnetism and Magnet-ic Materials. 2002. **241**. № 1. P. 144–155.
19. Hattori T., Fukamachi N., Goto R., Tezuka N., Sugimoto S. Microstructural Evaluation of Nd–Fe–B Strip Cast Alloys // Materials transactions. 2009. **50**. № 3. P. 479–482
20. Vasilenko D.Yu., Shitov A.V., Vlasyuga A.V., Popov A.G., Kudrevatykh N.V., Pechishcheva N.V. Microstructure and Properties of Nd–Fe–B Alloys Produced by Strip Casting and of Permanent Magnets Fabricated from Them // Metal science and heat treatment. 2015. **56**. № 11–12. P. 585–590.
21. Esin O.A., Gel'chinskij B.R., Vatolin N.A. O svyazi mezhdru vyazkost'yu i poverhnostnym natyazheniem v prostyh zhidkostyah [On the relationship between viscosity and surface tension in simple liquids] // ZHFH. 1975. **49**. № 11. P. 2955–2957. [In Russian].
22. Tyagunov G.V., Cepelev V.S., Kushnir M.N., Yakovlev G.N. Ustanovka dlya izmereniya kinema-ticheskoy vyazkosti metallicheskikh rasplavov [Installation for measuring the kinematic viscosity of metal melts] // Zavodskaya laboratoriya. 1980. **10**. P. 919–920. [In Russian].

23. Ryabina A.B., Kononenko V.I., Razhabov A.A. Bezelektroodnyj metod izmereniya elektrosoprotivleniya metallov v tverdom i zhidkom sostoyaniyah i ustanovka dlya ego realizacii [An electrodeless method for measuring the electrical resistance of metals in solid and liquid states and an installation for its implementation] // *Rasplavy*. 2009. № 1. С. 34–42. [In Russian].
24. Tyagunov G.V., Baum B.A., Cepelev V.S., Tyagunov A.G., Vloh A.N. Izmerenie udel'nogo elektricheskogo soprotivleniya metodom vrashchayushchegosya magnitnogo polya [Measurement of electrical resistivity by the method of rotating magnetic field] // *Zavodskaya laboratoriya*. 2003. 69. № 2. P. 36–38. [In Russian].
25. Ostrovskij O.I., Grigoryan V.A., Vishkarev A.F. Svoystva metallicheskikh rasplavov [Properties of metal melts]. M.: Metallurgiya, 1988. [In Russian].
26. Andrievskaya E.R. Phase equilibria in the refractory oxide of zirconia, hafnia and yttria with rare-earth oxides // *J. European Ceram. Soc.* 2008. **28**. P. 2363–2388.
27. Rouanet A. *Rev. Int. Hautes Temp. Refract.* 1971. **8**. P. 161.
28. Van Dijk M.P., de Vries K.J., Burgraaf A.J. Oxygen ion and mixed conductivity in compounds with the fluorite and pyrochlore structure // *Solid State Ionics*. 1983. **9–10**. P. 913–920.
29. Matsuura, Yutaka, Phase Diagram of the Nd–Fe–B Ternary System // *Japanese J. Applied Physics*. 1985. **24**. № 8. P. 635–637.
30. Tyunina E.Yu. Molyarnaya vyazkost' zhidkih metallov v intervale 300–4000 K [The molar viscosity of liquid metals in the range of 300–4000 K] // *Zhurnal fizicheskoy himii*. 2014. **88**. № 4. P. 557–563. [In Russian].
31. Nagel S.R., Tauc J. Nearly-Free-Electron Approach to the Theory of Metallic Glass Alloys // *Physical Review Letters*. 1975. **35**. № 6. P. 380–383.