

Кочеткова Е.А., Цепелев В.С., Вьюхин В.В., Коначков В.В., Поводатор А.М. Разработка рекомендаций по улучшению выплавки сплава мельхиора марки МН19 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 33–39. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.1.04

Kochetkova Y.A., Tsepelev V.S., Vyukhin V.V., Konashkov V.V., Povodator A.M. Development of recommendations to improve the melting of the melchior alloy mark MN19. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 33–39. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.1.04

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**  
**Т. 22, № 1, 2020**  
**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**  
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

DOI: 10.15593/2224-9877/2020.1.04  
УДК 669.35-19

**Е.А. Кочеткова, В.С. Цепелев, В.В. Вьюхин, В.В. Коначков, А.М. Поводатор**

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
Екатеринбург, Россия

**РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО УЛУЧШЕНИЮ ВЫПЛАВКИ**  
**СПЛАВА МЕЛЬХИОРА МАРКИ МН19**

Мельхиор – это сплав меди с никелем, для изменения некоторых свойств данного сплава добавляют железо и марганец в небольших количествах. Данный сплав достаточно хорошо обрабатывается в холодном и горячем состоянии, а также имеет высокую коррозионную стойкость. Цвет мельхиора серебристый, визуально трудно отличить от серебра. Благодаря такой особенности мельхиора сплав получил широкое применение в ювелирном деле. Также используется в производстве медицинских инструментов, высококачественных деталей морских лодок и в изделиях точной механики. Увеличивается прочность и коррозионная стойкость данного сплава с увеличением содержания никеля. В нынешних условиях промышленного производства усовершенствование технологических и служебных свойств сплавов возможно при расширении фундаментальных научных исследований и разработке на их основе новых технологических заключений. Новизна исследований заключается в развитии оригинального прикладного направления материаловедения в машиностроении: разработке рекомендаций по температурно-временному режиму выплавки мельхиора МН19 на основе представлений о приведении расплава в состояние кинетического и термодинамического равновесия с целью повышения и стабилизации качества продукции. Исследованы температурные зависимости структурно-чувствительных свойств жидкого сплава на основе меди. На политермах выявлены особые точки и участки. Получены новые экспериментальные данные о физических свойствах мельхиора марки МН19. Кинематическая вязкость, поверхностное натяжение, плотность и удельное электросопротивление были измерены в диапазоне температур от ликвидуса с превышением на 300–400 °С. Построены и приведены политермы, полученные при измерении кинематической вязкости, удельного электросопротивления, поверхностного натяжения и плотности. На основании полученных экспериментальных данных предложены следующие рекомендации: минимальный нагрев до температуры 1400 °С, выдержка ≈5 мин для гомогенизации расплава.

**Ключевые слова:** политерма, кинематическая вязкость, удельное электросопротивление, поверхностное натяжение, перегиб, гистерезис, структура, сплав, физические свойства сплава, мельхиор.

**Y.A. Kochetkova, V.S. Tsepelev, V.V. Vyukhin, V.V. Konashkov, A.M. Povodator**

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltzin,  
Yekaterinburg, Russian Federation

**DEVELOPMENT OF RECOMMENDATIONS TO IMPROVE THE MELTING**  
**OF THE MELCHIOR ALLOY MARK MN19**

Melchior is an alloy of copper and nickel; small amounts of iron and manganese are added to change some properties of this alloy. This alloy is quite well processed in cold and hot conditions, and also has a high corrosion resistance. The color of cupronickel is silver, it is visually difficult to distinguish from silver, due to such a feature of cupronickel, the alloy has been widely used in jewelry de le. It is also used in the manufacture of medical instruments, high-quality parts of marine boats and in precision mechanical products. The strength and corrosion resistance of this alloy increases with increasing nickel content. In the current conditions of industrial production, improvement of the technological and service properties of alloys is possible with the expansion of fundamental scientific research and the development of new technological conclusions based on them. The novelty of the research lies in the development of the original applied direction of materials science in mechanical engineering: the development of recommendations on the temperature-time regime for melting nickel silver MH19 based on the ideas about bringing the melt into a state of kinetic and thermodynamic equilibrium in order to improve and stabilize product quality. The temperature dependences of the structurally sensitive properties of a copper-based liquid alloy are investigated. On polytherms identified special points and sites. New experimental data on the physical properties of nickel silver brand MH19 are obtained. Kinematic viscosity, surface tension, density and electrical resistivity were measured in the temperature range from liquidus with an excess of 300–400 °C. The polytherms obtained by measuring the kinematic viscosity, electrical resistivity, surface tension and density are constructed and presented. Based on the obtained experimental data, the following recommendations are proposed: minimum heating to a temperature of 1400 °C, exposure ≈5 min for homogenization of the melt.

**Keywords:** polytherm, kinematic viscosity, electrical resistivity, surface tension, bend, hysteresis, structure, alloy, physical properties of the alloy, melchior.

## Введение

Мельхиор МН19 имеет следующий химический состав: Ni – 18,0–20,0 %, остальное – медь. Основным полезным свойством данного сплава является высокая коррозионная стойкость. Среди механических свойств сплава можно выделить высокую прочность благодаря содержанию в его составе никеля. Чем выше прочность сплава, тем больше содержание никеля в конкретной марке мельхиора. Также данный сплав отличается хорошей пластичностью, что позволяет обрабатывать его под давлением как в горячем, так и в холодном состоянии.

Мельхиор марки МН19 используется для изготовления деталей точной механики, монет, медицинских инструментов, сеток, столовой посуды, полосы (ГОСТ 5063–49) и ленты (ГОСТ 5187–49 и ГОСТ 1018–54). Сплав устойчив в щелочных растворах солей и органических соединениях.

Обширный спектр эксплуатационных преимуществ мельхиора обусловил практическое использование различных марок сплава во многих производственных отраслях [1].

Возможно усовершенствование свойств данного сплава с помощью воздействия на него в жидком и твердом состоянии. Для этого необходимо исследование структурного состояния расплава и влияния его особенностей на свойства и структуру, которые получаются при кристаллизации сплава. В данной работе проведено исследование удельного электросопротивления, кинематической вязкости, поверхностного натяжения и плотности сплава мельхиора МН19.

Средствами электронной микроскопии проведено металлографическое исследование микроструктуры поверхности образцов.

## Материалы и методы

Для исследования образцы мельхиора марки МН19 отобраны в лабораторных условиях. Химический состав исходных образцов определен с помощью спектрометра SPECTROMIDEX и приведен в таблице.

Кинематическую вязкость мельхиора марки МН19 измеряли методом Е.Г. Швидковского со ступенчатым изменением температуры  $T = 30$  °С. Этот метод, основанный на измерении параметров затухающих крутильных колебаний тигля с расплавом, который подвешен на упругой нити, является одним из наиболее надежных методов определения вязкости металлических расплавов при высоких температурах ( $T = 1000 \div 1700$  °С). Изменения в расплавленном металле при изменении темпера-

Химический состав образцов мельхиора МН19 для измерения вязкости, удельного электросопротивления и поверхностного натяжения (массовые доли химических элементов, мас. %)

Ni	Fe	C	Mn	S	Cu	Zn	Mg
18–20	0,5	12,6	0,02	0,002	78,5–82	0,04	0,2

туры или изотермическом химическом воздействии влияют на кинематическую вязкость расплава.

Для изучения кинематической вязкости необходимо соблюдать такие требования, как проведение вспомогательных операций (пробоподготовка, взвешивание, правильная загрузка в установку), поддержание температурного режима и чистоты атмосферы, измерение декремента затухания колебаний и расчет значений вязкости. Большое количество компьютерных программ и теоретических моделей было разработано для преобразования декремента затухания в вязкость [2–5].

Экспериментальные исследования проводились на установке [6, 7] для измерения кинематической вязкости расплавов, которая состоит из корпуса установки – водоохлаждаемой вакуумной камеры, системы вакуумирования и напуска газа, системы нагрева и контроля температуры и системы регистрации крутильных колебаний.

Исследования проводили в атмосфере высококислородного гелия под давлением  $10^5$  Па в режиме нагрева от  $T = 1300$  до  $1600$  °С и последующего охлаждения образца. При выполнении измерений запись параметров колебаний осуществлялась оптически с использованием автоматической системы записи фотографий.

Для исследования температурных зависимостей удельного электросопротивления мельхиора марки МН19 использовали метод вращающегося магнитного поля (метод А.Р. Регеля). А.Р. Регель изобразил, что угол закручивания подвесной системы  $\phi$  пропорционален удельной проводимости металла, если радиус цилиндрического образца соизмерим с высотой [8–11]. В режиме нагрева и последующего охлаждения образца проведены измерения удельного электросопротивления в диапазоне температур  $T = 1350 \div 1470$  °С. В предварительно вакуумированную до  $0,001$  Па рабочую камеру запускали гелий под давлением  $\sim 10^5$  Па. Производился нагрев образцов до  $T = 1350 \div 1470$  °С с шагом  $30\text{--}40$  °С. Измерения удельного электросопротивления были выполнены на оригинальной установке [12–14].

Для проведения экспериментальных исследований по изучению поверхностного натяжения использовалась установка горизонтального типа.

Методом лежащей капли измеряли плотность и поверхностное натяжение мельхиора марки МН19 в режиме нагрева до  $T = 1470$  °С и последующего охлаждения образца.

Металлический корпус печи закреплен на специальной подставке. Внутри него установлен молибденовый нагреватель с системой экранов. Для получения изображения капли металла на экране оптической системы один из торцевых фланцев имеет окно, защищенное просветленным стеклом. Через другой фланец в пространство печи рабочей камеры вводится шток, который заканчивается стержнем из молибдена с горизонтальной площадкой для установки подложки с исследуемым образцом. Рабочую камеру предварительно вакуумировали до  $\sim 1$  Па. Затем запускали гелий до давления  $\sim 10^5$  Па. Производили нагрев образцов до  $T = 1470$  °С с шагом 30–50 °С. Изотермические выдержки в точках отсчета составляли не менее 15 мин. Профиль исследуемой капли снимали цифровой видеокамерой с копированием изображения на компьютер, геометрические размеры профиля капли определяли с помощью программы анализа изображений SIAMS 700, с точностью 0,3°–0,6°. Используемый метод измерения плотности и поверхностного натяжения металлических расплавов и экспериментальная установка описаны в работах [15–24].

Для исследования микроструктуры поверхности образцов проводили стандартную пробоподготовку металлографического исследования, которая заключалась в шлифовании образца с уменьшением размера абразива наждачной бумаги, после проводили полировку образцов на алмазной пасте с размером абразива 6 мкм. Далее было произведено травление образца для выявления микроструктуры в 10%-ном растворе аммиака. После чего смотрели микроструктуру с помощью металлографического микроскопа NikonEpihot 200.

### Результаты экспериментов

В результате проведенных экспериментов построены и приведены политермы, полученные при измерении кинематической вязкости мельхиора марки МН19.

Произвели нагрев образца до температуры  $T = 1350$  °С. На температурных зависимостях вязкости, которые были получены в режиме нагрева, в области  $T = 1300 \div 1350$  °С наблюдалось уменьшение значений вязкости и гистерезис при последующем охлаждении (рис. 1). При нагреве образца до температуры  $T = 1400$  °С на политермах вязкости наблюдали уменьшение значений вязкости. Также на температурных зависимостях вязкости

расплава наблюдался гистерезис в области 1250–1400 °С (рис. 2).

Наличие гистерезиса указывает на исчезновение несбалансированных неоднородностей. Перегибы говорят о немонотонности, иногда о скачке в процессе перехода от системы к равновесию. При нагревании до заданных температур, называемых критическими, расплав переводился в состояние равновесия [24, 25].  $T = 1300 \div 1360$  °С – переходная область, при которой происходит интенсивная перестройка расплава, о чем свидетельствуют полученные политермы. При уменьшении времени в жидком состоянии в режиме нагрева эта область расширялась в направлении высоких температур (см. рис. 2).

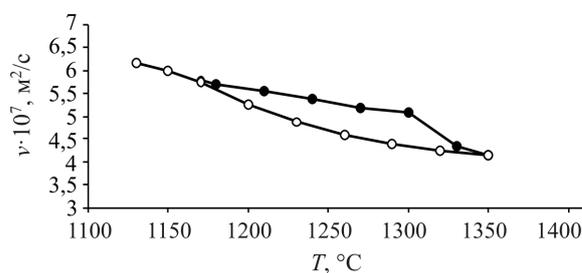


Рис. 1. Температурная зависимость кинематической вязкости мельхиора МН19 при нагреве до 1350 °С (• – нагрев, ○ – охлаждение)

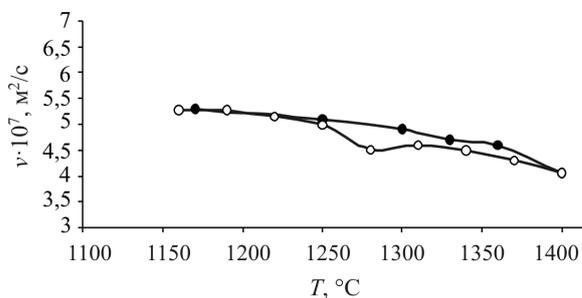


Рис. 2. Температурная зависимость кинематической вязкости мельхиора МН19 при нагреве до 1400 °С (• – нагрев, ○ – охлаждение)

Проведены термовременная выдержка расплава при  $T = 1300$  °С, нагрев до этой температуры, его выдержка в течение 80 мин с последующим охлаждением (рис. 3). После 50 мин расплав приходил в равновесное состояние. При меньших значениях времени наблюдалась осцилляция.

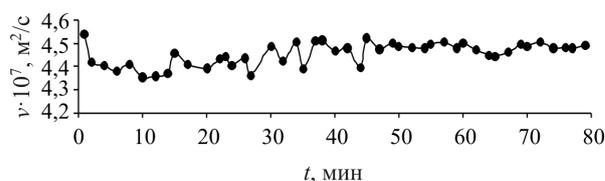


Рис. 3. Термовременная выдержка в течение 80 мин при  $T = 1300$  °С (• – нагрев)

Вязкость является структурно-чувствительным свойством расплава, поэтому можно полагать, что имеющиеся особенности на политермах вязкости жидкого сплава МН19 определены структурными превращениями в нем. Гистерезис изменения вязкости в зависимости от температуры указывает на изменение состояния расплава при нагреве, а затем охлаждении. В случае использования нагрева при предельной температуре с минимальным временем выдержки процесс перевода расплава в устойчивое состояние более эффективен, чем при нагреве ниже критической температуры, но при длительной выдержке сплава.

Результаты измерения температурной зависимости плотности мельхиора марки МН19 представлены на рис. 4.

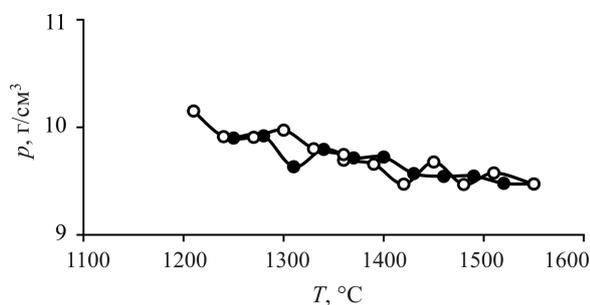


Рис. 4. Температурная зависимость плотности мельхиора МН19 (• – нагрев, ○ – охлаждение)

При плавлении плотность сплава мельхиора марки МН19 уменьшается на 1,5%, а в жидком состоянии линейно уменьшается с ростом температуры.

При  $T = 1300 \div 1360$  °C разрушается пленка, что подтверждает улучшение однородности расплава.

Температурная зависимость поверхностного натяжения мельхиора МН19 представлена на рис. 5.

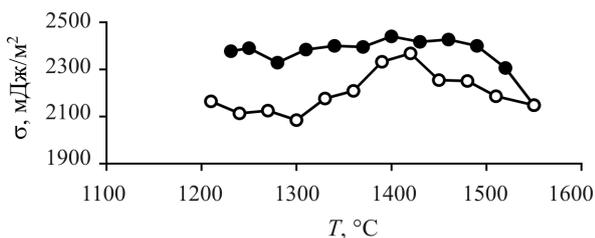


Рис. 5. Температурная зависимость поверхностного натяжения мельхиора МН19 (• – нагрев, ○ – охлаждение)

Результаты измерения температурной зависимости удельного электросопротивления мельхиора марки МН19 при нагреве в район аномалии представлены на рис. 6, 7.

Проводилось сравнительное исследование структуры сплавов в твердом состоянии в зависимости от температуры нагрева расплава. Температуры нагрева выбирали в соответствии с экспериментальными данными по вязкости: 1350 и 1400 °C.

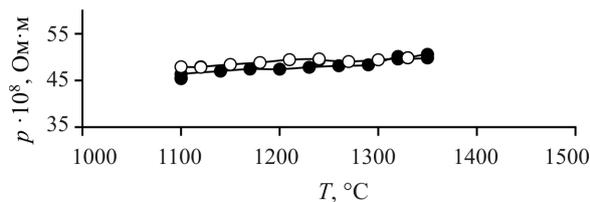


Рис. 6. Температурная зависимость удельного электросопротивления мельхиора МН19 при нагреве до 1350 °C (• – нагрев, ○ – охлаждение)

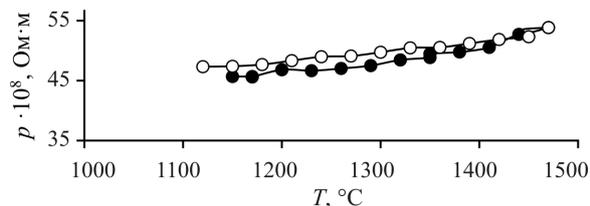


Рис. 7. Температурная зависимость удельного электросопротивления мельхиора МН19 при нагреве до 1470 °C (• – нагрев, ○ – охлаждение)

Средствами электронной микроскопии исследовали металлографическую микроструктуру поверхности образцов. Обнаружено наличие дендритной структуры. При  $T = 1350$  °C (рис. 8) мы наблюдали более крупное зерно, чем при  $T = 1400$  °C (рис. 9). На физико-химические и коррозионные свойства сплавов оказывают существенное влияние размеры зерен, их форма и ориентация.

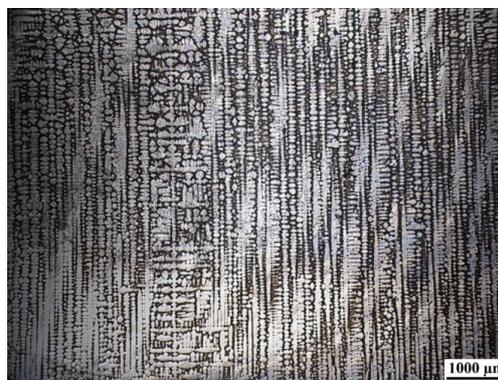


Рис. 8. Структура поверхности сплава мельхиора марки МН19 при нагреве до  $T = 1350$  °C



Рис. 9. Структура поверхности сплава мельхиора марки МН19 при нагреве до  $T = 1400$  °C

Сплавы, имеющие мелкозернистую структуру, обладают, как правило, более высокой пластичностью и коррозионной стойкостью, по сравнению с теми же сплавами, имеющими более крупное зерно.

### Заключение

Исследованы температурные зависимости структурно-чувствительных свойств жидкого сплава. На поллитерах выявлены особые точки и аномалии.

В результате проведенной работы получены новые экспериментальные данные о физических свойствах сплава мельхиора МН19. Определены значения характерных критических температур и температур гистерезиса вязкости, при которых структура расплава претерпевает существенные перестройки.

На основании полученных экспериментальных данных для технологии плавления этого сплава даны следующие рекомендации: минимальный нагрев при температуре 1400 °С, время выдержки 5 мин для гомогенизации слияния.

### Список литературы

1. Металловедение меди и медных сплавов: сб. ст. / под ред. В.М. Розенберга. – М.: Металлургия, 1975. – Вып. 48. – 159 с.
2. Автоматизированная система определения кинематической вязкости расплавов / Д.В. Егоров, В.С. Цепелев, Г.В. Тягунов, С.В. Пастухов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 1998. – Т. 64, № 11. – С. 46–48.
3. Бельтюков А.Л., Ладыанов В.И., Олянина Н.В. Об особенностях измерения вязкости металлических расплавов методом крутильных колебаний // Расплавы. – 2009. – № 6. – С. 919–920.
4. Поводатор А.М., Цепелев В.С., Конашков В.В. Экспресс-измерение декремента затухания при фотометрическом определении вязкости высокотемпературных металлических сплавов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2015. – Т. 58, № 6. – С. 407–411.
5. Устройство бесконтактного определения вязкости образцов металлических расплавов: пат. 2668958 Рос. Федерация / Поводатор А.М., Вьюхин В.В., Цепелев В.С., Конашков В.В. – № 2017128061; заявл. 04.08.2017; опубл. 05.10.2018, Бюл. № 28.
6. Установка для измерения кинематической вязкости металлических расплавов / Г.В. Тягунов, В.С. Цепелев, М.Н. Кушнир, Г.Н. Яковлев // Заводская лаборатория. – 1980. – № 10. – С. 919–920.
7. Датчик устройства бесконтактного определения вязкости образцов металлических расплавов: пат. на полезную модель 176448 Рос. Федерация / Поводатор А.М., Цепелев В.С., Вьюхин В.В., Конашков В.В. – № 2017128021; заявл. 04.08.2017; опубл. 18.10.2018, Бюл. № 2.
8. Регель А.Р. Измерение электропроводности металлов во вращающемся магнитном поле // ЖФХ. – 1948. – Т. 18, № 6. – С. 1511–1520.
9. Воронков В.В., Иванова И.И., Туровский Б.М. О применении метода вращающегося магнитного поля для измерения электропроводности расплавов // Магнитная гидродинамика. – 1973. – № 2. – С. 147–149.
10. 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.
11. Устройство для бесконтактного измерения удельного электрического сопротивления металлического сплава методом вращающегося магнитного поля: пат. на полезную модель 147367 Рос. Федерация / Поводатор А.М., Цепелев В.С., Вьюхин В.В. – № 2013149438; заявл. 06.11.2013; опубл. 10.11.2014, Бюл. № 31.
12. Способ определения удельного электросопротивления расплавов и устройство для его осуществления: пат. 2535525 Рос. Федерация / Вьюхин В.В., Конашков В.В., Цепелев В.С., Поводатор А.М. – № 2013118767; заявл. 23.04.2013; опубл. 10.12.2013, Бюл. № 34.
13. Измерение удельного электрического сопротивления методом вращающегося магнитного поля / Г.В. Тягунов [и др.] // Заводская лаборатория. – 2003. – Т. 69, № 2. – С. 36–38.
14. Устройство для фотометрического определения удельного электросопротивления металлических расплавов: пат. 2 629699 Рос. Федерация / Поводатор А.М., Цепелев В.С., Вьюхин В.В., Конашков В.В. – № 206109537; заявл. 16.03.2016; опубл. 31.08.2017, Бюл. № 25.
15. Иващенко Ю.Н., Еременко В.Н. Основы прецизионного измерения поверхностной энергии металлов по методу лежащей капли. – Киев: Наукова думка, 1972. – 232 с.
16. Кошевник А.Ю., Кусаков М.М., Лубман Н.М. Об изменении поверхностного натяжения жидкостей по размерам лежащей капли // ЖФХ. – 1953. – Т. 27, № 12. – С. 1886–1890.
17. Директор Л.Б., Зайченко В.М., Майков И.Л. Усовершенствованный метод лежащей капли для определения поверхностного натяжения жидкостей // Теплофизика высоких температур. – 2010. – Т. 48, № 2. – С. 193–197.
18. О высокотемпературных измерениях поверхностного натяжения металлов в условиях вакуума / В.К. Кумыков, И.Н. Сергеев, В.А. Созаев [и др.] // Известия РАН. Серия физическая. – 2007. – № 5. – С. 631–633.
19. Иващенко Ю.Н., Хиля Г.П. Установка для измерения свободной поверхностной энергии, контактного угла и плотности расплавов методом лежащей капли // Приборы и техника эксперимента. – 1972. – № 6. – С. 208–211.
20. Surface tension of molten Cu-Sn alloys under different oxygen containing atmospheres / E. Ricci, D. Giuranno, I. Grosso, T. Lanata, S. Amore, R. Novakovic, E. Arato // J. of Chem. and Eng. Data. – 2009. – Vol. 54, no. 6. – P. 1660–1665.
21. Prasad L.C., Chatterjee S.K., Jha R.K. Atomic order and interionic pair potentials in Cu-Sn liquid alloys // J. of Alloys and Compounds. – 2007. – Vol. 441, no. 1–2. – P. 43–51.
22. Способ и устройство для определения плотности и поверхностного натяжения металлических расплавов: пат. 2613592 Рос. Федерация / Цепелев В.С., Вьюхин В.В., Поводатор А.М. – № 2017128028; заявл. 04.08.2017; опубл. 03.08.2018, Бюл. № 8.

23. Устройство для изучения физических свойств каплеобразных образцов металлических расплавов: пат. на полезную модель 178676 Рос. Федерация / Вьюхин В.В., Поводатор А.М., Цепелев В.С., Коначков В.В. – № 2017128028; заявл. 04.08.2017; опубл. 17.04.2018, Бюл. № 11.

24. Металлические жидкости. Стали и сплавы: монография / Г.В. Тягунов, Е.Е. Барышев, В.С. Цепелев [и др.]; под ред. Г.В. Тягунова; УрФУ. – Екатеринбург, 2016. – 268 с.

25. Способ оценки равновесности металлических расплавов: пат. 2680984 Рос. Федерация / Тягунов Г.В., Цепелев В.С., Поводатор А.М., Барышев Е.Е., Тягунов А.Г., Вьюхин В.В., Мушников В.С. – № 2017146126; заявл. 26.12.2017; опубл. 01.03.2017, Бюл. № 7.

### References

1. Metallovedenie medi i mednykh splavov [Metal science of copper and copper alloys]. Ed. V.M. Rozenberga. Moscow: Metallurgiya, 1975, 159 p.

2. Egorov D.V., Tsepelev V.S., Tiagunov G.V., Pastukhov S.V. Avtomatizirovannaya sistema opredeleniya kinematicheskoi viazkosti rasplavov [Automated system for determination of melt kinematic viscosity]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 1998, vol. 64, no. 11, pp. 46–48.

3. Bel'tiukov A.L., Lad'ianov V.I., Olianina N.V. Ob osobennostiakh izmereniya viazkosti metallicheskih rasplavov metodom krutivnykh kolebaniy [On features of measuring the viscosity of metal races by torsion oscillation method]. *Rasplavy*, 2009, no. 6, pp. 919–920.

4. Povodator A.M., Tsepelev V.S., Konashkov V.V. Ekspress-izmerenie dekrementa zatukhaniya pri fotometricheskom opredelenii viazkosti vysokotemperaturnykh metallicheskih splavov [Rapid measurement of attenuation decrement for the photometric determination of the viscosity of high-temperature metal alloys]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 2015, vol. 58, no. 6, pp. 407–411.

5. Povodator A.M., V'iukhin V.V., Tsepelev V.S., Konashkov V.V. Ustroystvo beskontaktnogo opredeleniya viazkosti obraztsov metallicheskih rasplavov [Contactless viscosity determination device for metal melt samples]. Patent Rossiyskaya Federatsiya no. 2 668 9582018 (2018).

6. Tiagunov G.V., Tsepelev V.S., Kushnir M.N., Iakovlev G.N. Ustanovka dlia izmereniya kinematicheskoi viazkosti metallicheskih rasplavov [Kinematic Viscosity Measurement Unit for Me-Tallic Melts]. *Zavodskaya laboratoriya*, 1980, no. 10, pp. 919–920.

7. Povodator A.M., Tsepelev V.S., V'iukhin V.V., Konashkov V.V. Datchik ustroystva beskontaktnogo opredeleniya viazkosti obraztsov metallicheskih rasplavov [Sensor of the non-contact viscosity determination device for metal melt samples]. Patent Rossiyskaya Federatsiya no. 176 448 (2018).

8. Regel' A.R. Izmerenie elektroprovodnosti metallov vo vrashchayushchemsya magnitnom pole [Measurement of electrical conductivity of metals in a rotating magnetic field]. *ZhFKh*, 1948, vol. 18, no. 6, pp. 1511–1520.

9. Voronkov V.V., Ivanova I.I., Turovskii B.M. O primeneniya metoda vrashchayushchegosya magnitnogo polia dlia izmereniya elektroprovodnosti rasplavov [On the application of the rotating magnetic field method to measure the electrical conduc-

tivity of melts]. *Magnitnaya gidrodinamika*, 1973, no. 2, pp. 147–149.

10. Riabina A.B., Kononenko V.I., Razhabov A.A. Bezelektroodnyi metod izmereniya elektrosoprotivleniya metallov v tverdom i zhidkom sostoianiiakh i ustanovka dlia ego realizatsii [Electrode-free method for measuring the electrical resistance of metals in solid and liquid states and installation for its implementation]. *Rasplavy*, 2009, no. 1, pp. 34–42.

11. Povodator A.M., Tsepelev V.S., V'iukhin V.V. Ustroystvo dlia beskontaktnogo izmereniya udel'nogo elektricheskogo soprotivleniya metallicheskogo splava metodom vrashchayushchegosya magnitnogo polia [Device for non-contact measuring of the electrical resistivity of a metal alloy by means of a rotating magnetic field]. Patent Rossiyskaya Federatsiya no. 147367 (2014).

12. V'iukhin V.V., Konashkov V.V., Tsepelev V.S., Povodator A.M. Sposob opredeleniya udel'nogo elektrosoprotivleniya rasplavov i ustroystvo dlia ego osushchestvleniya [Method for determining the specific electrical resistance of melts and the device for its realization]. Patent Rossiyskaya Federatsiya no. 2535525. (2014).

13. Tiagunov G.V. et al. Izmerenie udel'nogo elektricheskogo soprotivleniya metodom vrashchayushchegosya magnitnogo polia [Measuring the electrical resistivity of a rotating magnetic field by honeycomb]. *Zavodskaya laboratoriya*, 2003, no. 2, vol. 69, pp. 36–38.

14. Povodator A.M., Tsepelev V.S., V'iukhin V.V., Konashkov V.V. Ustroystvo dlia fotometricheskogo opredeleniya udel'nogo elektrosoprotivleniya metallicheskih rasplavov [Device for photometric determination of the electrical resistivity of metal melts]. Patent Rossiyskaya Federatsiya no. 2 629699 (2017).

15. Ivashchenko Iu.N., Eremenko V.N. Osnovy pretzionnogo izmereniya poverkhnostnoi energii metallov po metodu lezhashchei kapli [Basics of Precision Metal Surface Energy Measurement by the Bed-Drop Method]. Kiev: Naukova Dumka, 1972, 232 p.

16. Koshevnik A.Iu., Kusakov M.M., Lubman N.M. Ob izmenenii poverkhnostnogo natiazheniya zhidkosti po razmeram lezhashchei kapli [On the change in the surface tension of liquids by the size of the lying drop]. *ZhFKh*, 1953, vol. 27, no. 12, pp. 1886–1890.

17. Direktor L.B., Zaichenko V.M., Maikov I.L. Usovershenstvovannyi metod lezhashchei kapli dlia opredeleniya poverkhnostnogo natiazheniya zhidkosti [Advanced lie-drop method for determining the surface tension of liquids]. *Teplofizika vysokikh temperature*, 2010, vol. 48, no. 2, pp. 193–197.

18. Kумыков V.K., Sergeev I.N., Sozaev V.A. et al. O vysokotemperaturnykh izmereniyakh poverkhnostnogo natiazheniya metallov v usloviyakh vakuuma [On high-temperature measurements of the surface tension of metals under vacuum conditions]. *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya*, 2007, no. 5, pp. 631–633.

19. Ivashchenko Iu. N., Khilia G.P. Ustanovka dlia izmereniya svobodnoi poverkhnostnoi energii, kontaktnogo ugla i plotnosti rasplavov metodom lezhashchei kapli [Installation for measuring free surface energy, contact angle and melt density using the lay-down drop method]. *Priory i tekhnika eksperimenta*, 1972, no. 6, pp. 208–211.

20. Ricci E., Giuranno D., Grosso I., Lanata T., Amore S., Novakovic R., Arato E. Surface tension of molten Cu-Sn alloys under different oxygen containing atmospheres. *Journal*

of *Chemical and Engineering Data*, 2009, vol. 54, no. 6, pp. 1660–1665.

21. Prasad L.C., Chatterjee S.K., Jha R.K. Atomic order and interionic pair potentials in Cu–Sn liquid alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2007, vol. 441, no. 1–2, pp. 43–51.

22. Tsepelev V.S., V'yukhin V.V., Povodator A.M. Spособ i ustroistvo dlia opredeleniia plotnosti i poverkhnostnogo natiazheniia metallicheskikh rasplavov [Method and device for determination of density and surface tension of metal melts]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2613592 (2018).

23. V'yukhin V.V., Povodator A.M., Tsepelev V.S., Konashkov V.V. Ustroistvo dlia izuchenii fizicheskikh svoystv kapleobraznykh obraztsov metallicheskikh rasplavov [Device for study of physical properties of droplet-like different samples of metallic melts]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 178676 (2018).

24. Tiagunov G.V., Baryshev E.E., Tsepelev V.S. et al. Metallicheskie zhidkosti. Stali i splavy: monografiia [Metal liquids. Steels and Alloys: Monograph] Ed. G.V. Tiagunova. UrFU. Ekaterinburg, 2016, 268 p.

25. Tiagunov G.V., Tsepelev V.S., Povodator A.M., Baryshev E.E., Tiagunov A.G., V'yukhin V.V., Mushnikov V.S. Spособ otsenki ravnovesnosti metallicheskikh rasplavov [Method for evaluating the equilibrium of metallic melts]. Rossiiskaia Federatsiia no. 2680984 (2017).

Получено 05.07.2019

Опубликовано 25.03.2020

#### Сведения об авторах

**Кочеткова Екатерина Александровна** (Екатеринбург, Россия) – аспирант Исследовательского центра физики металлических жидкостей Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: kochetkovayekaterina@mail.ru.

**Цепелев Владимир Степанович** (Екатеринбург, Россия) – доктор технических наук, профессор, директор Исследовательского центра физики металлических жидкостей Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: v.s.tsepelev@urfu.ru.

**Вьюхин Владимир Викторович** (Екатеринбург, Россия) – старший научный сотрудник Исследователь-

ского центра физики металлических жидкостей Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: v.v. vyukhin@urfu.ru.

**Конашков Виктор Васильевич** (Екатеринбург, Россия) – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Исследовательского центра физики металлических жидкостей Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: vvK98005@gmail.com.

**Поводатор Аркадий Моисеевич** (Екатеринбург, Россия) – научный сотрудник Исследовательского центра физики металлических жидкостей Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: bandys573@gmail.com.

#### About the authors

**Yekaterina A. Kochetkova** (Yekaterinburg, Russian Federation) – Postgraduate Student, Research Center for the Physics of Metallic Liquids, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; e-mail: kochetkovayekaterina@mail.ru.

**Vladimir S. Tsepelev** (Ekaterinburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director, Research Center for the Physics of Metallic Liquids, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; e-mail: v.s.tsepelev@urfu.ru.

**Vladimir V. Vyukhin** (Yekaterinburg, Russian Federation) – Senior Researcher, Research Center for the Physics of Metallic Liquids, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; e-mail: v.v. vyukhin@urfu.ru.

**Viktor V. Konashkov** (Yekaterinburg, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Senior Researcher, Research Center for the Physics of Metallic Liquids, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; e-mail: vvK98005@gmail.com.

**Arkady M. Povodator** (Yekaterinburg, Russian Federation) – Researcher, Research Center for the Physics of Metallic Liquids, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; e-mail: bandys573@gmail.com.