

УДК 537.8

DOI 10.25587/2222-5404-2024-21-1-81-88

Разработка способа измерения импульсных токов большой величины

В. П. Татаринов¹, П. С. Татаринов¹, Ю. В. Бебихов¹, А. С. Семёнов¹ ✉, С. В. Дмитриев^{2,3}

¹Политехнический институт (филиал) СВФУ им. М.К. Аммосова, г. Мирный, Россия

²Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН, г. Уфа, Россия

³Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа, Россия

✉ sash-alex@yandex.ru

Аннотация. В работе представлены результаты исследования по поиску корректных методов измерения импульса тока большого значения, которые будут применены для проведения исследований по электропластическому эффекту. Электропластическим эффектом называется влияние импульсов электрического тока на пластическое течение металлов. Технология электропластической обработки металлов давлением – это относительно новый процесс формоизменения металлов, который является энергоэффективным, экологически чистым и универсальным. В частности, он может быть использован для обработки металлов или сплавов, которые трудно обрабатывать с помощью обычных производственных процессов. Для экспериментального исследования электропластического эффекта появилась необходимость измерения импульсных токов большой величины, причем не только по амплитуде, но и по форме импульса. Импульсный ток вызывает образование вблизи проводников переменного электромагнитного поля, поэтому его можно измерять трансформатором тока Роговского. В результатах работы представлены принципиальная электрическая схема и фотография с внешним видом экспериментальной установки для исследования электропластического эффекта. Показаны результаты измерений значения тока, падения напряжения на образце и зависимости пиковых значений напряжения на образце от пикового значения тока. После произведения расчетов и перенормировки данных для падения напряжения на образце по пиковому значению тока, полученного на трансформаторе, авторы получили искомые значения тока. Произведена оценка погрешности данного метода через расчет суммарной емкости конденсаторов, которая не превышает 2%.

Ключевые слова: электропластический эффект, обработка металлов, медная проволока, импульсный ток, конденсаторные батареи, измерения, осциллограммы напряжения и тока, электрический заряд, трансформатор тока, магнитная индукция.

Ю. В. Бебихов (описание физических основ электропластического эффекта) благодарит за поддержку исследования Российский научный фонд, грант 24-22-00092 (<https://rscf.ru/project/24-22-00092/>).

Для цитирования: Татаринов В. П., Татаринов П. С., Бебихов Ю. В., Семёнов А. С., Дмитриев С. В. Разработка способа измерения импульсных токов большой величины. Вестник СВФУ. 2024, Т. 21, №1. С. 81–88. DOI: 10.25587/2222-5404-2024-21-1-81-88

Development of a method for measuring pulse currents of large magnitude

V. P. Tatarinov¹, P. S. Tatarinov¹, Yu. V. Bebikhov¹, A. S. Semenov¹ ✉, S. V. Dmitriev^{2,3}

¹Polytechnic Institute (branch) M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Mirny, Russia

²Institute of Molecule and Crystal Physics UFRC RAS, Ufa, Russia

³Institute for Metals Superplasticity Problems RAS, Ufa, Russia

✉ sash-alex@yandex.ru

Abstract. The paper presents the results of a study on the search for correct methods for measuring a high-value current pulse, which will be used to conduct research on the electroplastic effect. The electroplastic effect is the effect of electric current pulses on the plastic flow of metals. Electroplastic metal forming technology is a relatively new metal forming process that is energy efficient, environmentally friendly and versatile. In particular, it can be used to process metals or alloys that are difficult to process using conventional manufacturing processes. For the experimental study of the electroplastic effect, it became necessary to measure pulse currents of large magnitude, not only in amplitude, but also in the shape of the pulse. The pulsed current causes the formation of an alternating electromagnetic field near the conductors, so it can be measured with a Rogovsky current transformer. The results of the work present a schematic electrical diagram and a photograph with the appearance of an experimental installation for the study of the electroplastic effect. The results of measurements of the current value, the voltage drop on the sample and the dependence of the peak voltage values on the sample on the peak current value are shown. After making calculations and renormalising the data for the voltage drop on the sample according to the peak value of the current obtained on the transformer, the authors obtained the desired current values. The error of this method is estimated by calculating the total capacitance of capacitors, which does not exceed 2%.

Keywords: electroplastic effect, metal processing, copper wire, pulse current, capacitor banks, measurements, voltage and current waveforms, electric charge, current transformer, magnetic induction.

Yu. V. Bebikhov (description of the physical basis of the electroplastic effect) is grateful for research support from the Russian Science Foundation, grant 24-22-00092 (<https://rscf.ru/project/24-22-00092/>).

For citation: Tatarinov V. P., Tatarinov P. S., Bebikhov Yu. V., Semenov A. S., Dmitriev S. V. Development of a method for measuring pulse currents of large magnitude. Vestnik of NEFU. 2024, Vol. 21, No. 1. Pp. 81–88. DOI: 10.25587/2222-5404-2024-21-1-81-88

Введение

Технология электропластической обработки металлов давлением (ЭОМД) – это относительно новый процесс формоизменения металлов, который является энергоэффективным, экологически чистым и универсальным. В частности, он может быть использован для обработки металлов или сплавов, которые трудно обрабатывать с помощью обычных производственных процессов. Пропускание электрических импульсов через металлы в процессе их деформации резко снижает напряжение течения и значительно повышает пластичность. Влияние импульсов электрического тока на пластическое течение металлов называется электропластическим эффектом (ЭПЭ) [1]. Для экспериментального исследования ЭПЭ появилась необходимость измерения импульсных токов большой величины не только по амплитуде, но и по форме импульса, т. е. требовалась информация об эволюции моментального значения тока в импульсе

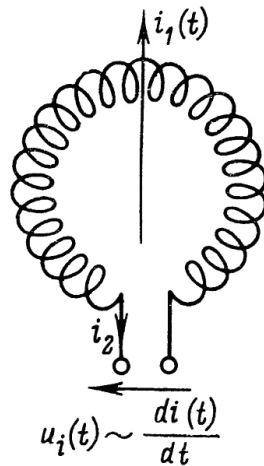


Рис. 1. Трансформатор тока Роговского
Fig. 1. Transformer of the Rogovsky current

[2–4]. Таким образом, в настоящей работе представлены результаты исследования по поиску корректных методов измерения импульса тока большого значения, которые будут применены для проведения исследований по ЭПЭ. Исследования проведены на кафедре электроэнергетики и автоматизации промышленного производства МПТИ (ф) СВФУ на базе лабораторий физики и теоретических основ электротехники, а также в лаборатории Института проблем сверхпластичности металлов РАН (г. Уфа).

Методы исследования

Импульсный ток вызывает образование вблизи проводников переменного электромагнитного поля [5–7]. Магнитное поле индуцирует в витках катушки, охватывающей провод с током, напряжение $U(t)$ пропорционально производной тока $\frac{dI}{dt}$ (рис. 1).

Принцип действия пояса Роговского (трансформатора тока) основан на теореме о циркуляции для вектора магнитной индукции: $\oint_{\Gamma} \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 I$ [8].

Линейный интеграл магнитной индукции $\vec{B}$ пропорционален полному току, заключенному внутри контура интегрирования по замкнутой кривой. Путь интегрирования может быть любым, однако он должен быть замкнутым и охватывать измеряемый ток [9, 10]. Индуцированное при изменении магнитного поля напряжение в катушке, навитой вокруг силовых линий, с числом витков n и площадью витка S равно:

$$U_k(t) \approx M \frac{dI_n}{dt},$$

где M – коэффициент взаимной индукции между проводником с током I_n и катушкой.

Таким образом, можно составить дифференциальное уравнение, описывающее напряжение, измеряемое на трансформаторе:

$$\varepsilon + \frac{L}{R} \frac{d\varepsilon}{dt} = M \frac{dI_n}{dt},$$

где L – коэффициент самоиндукции катушки, R – сопротивление нагрузки.

Для случая $I_n \gg I_k$ можно оценить I_n как $I_n = \frac{L}{MR} \varepsilon$, где I_k – ток в катушке, ε – измеренное осциллографом напряжение.

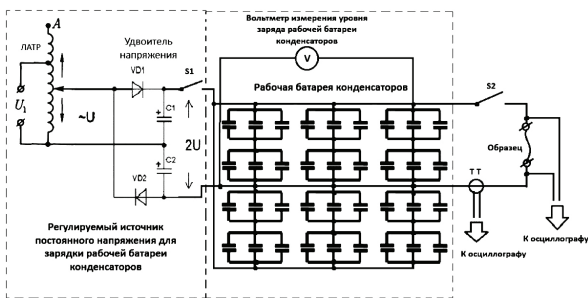


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема экспериментальной установки для исследования эффекта электропластичности

Fig. 2. Principal electric scheme of the experimental setup for the electroplasticity effect research

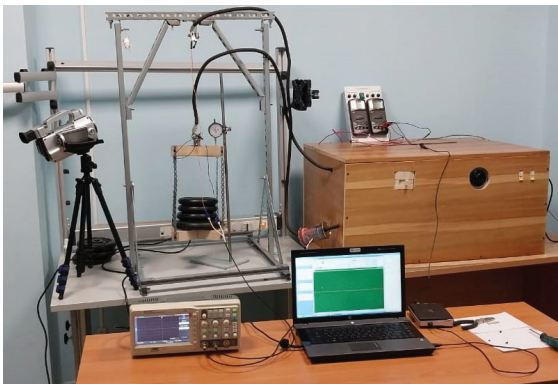


Рис. 3. Экспериментальная установка для изучения эффекта электропластичности

Fig. 3. Experimental setup for the electroplasticity effect research

Результаты исследования

Экспериментальная установка

Регулируемый источник постоянного напряжения для зарядки рабочей батареи конденсаторов собран на основе лабораторного автотрансформатора и удвоителя напряжения по простейшей схеме Латура-Делона-Гренашера [11] (рис. 2). Выключатель S1 используется для отключения зарядки по достижении необходимого для эксперимента уровня заряда, контролируемого визуально вольтметром измерения уровня напряжения, а значит и заряда на рабочей батарее конденсаторов.

Для проведения эксперимента по воздействию импульсного тока на исследуемый объект после зарядки рабочей батареи конденсаторов до нужного уровня напряжения и отключения выключателя S1 рабочую батарею конденсаторов разряжают через исследуемый образец, замыкая выключателем S2. Одновременно контролируются падение напряжения и ток через образец. Ток фиксируется с помощью трансформатора тока ТТ, отклик которого подается на вход осциллографа, а падение напряжения на исследуемом образце через делитель также подается на вход осциллографа.

Трансформатор тока изготовлен из ферритового кольца марки 2000НМ1 с типоразмерами К45,0х28,0х12, на который намотано 140 витков провода марки ПЭВ-1 с диаметром сечения 0,5 мм.

В рабочей батарее использованы 36 штук однотипных электролитических конденсаторов с емкостью 3300 мкФ и рабочим напряжением до 400 В каждый. Общая емкость рабочей батареи конденсаторов 29 700 мкФ, а рабочее напряжение до 800 В. Внешний вид экспериментальной установки для изучения электропластического эффекта показан на рис. 3, где справа в фанерном ящике собран силовой блок.

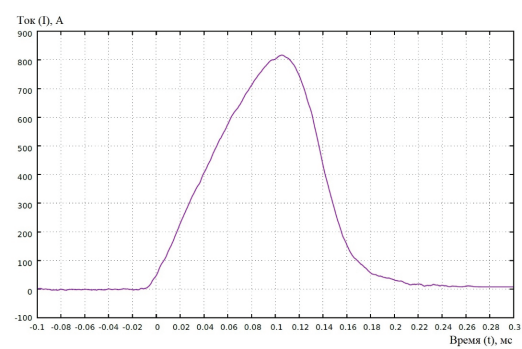


Рис. 4. Значения тока, измеренные при помощи трансформатора тока
Fig. 4. Current values measured with a current transformer

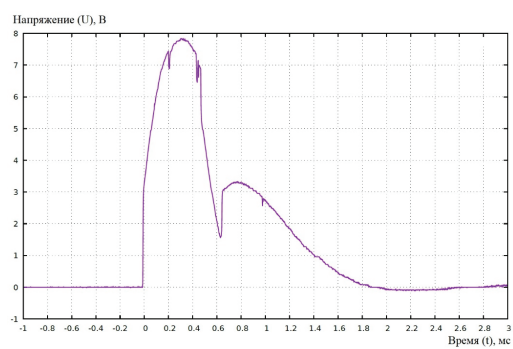


Рис. 5. Значения падения напряжения на образце
Fig. 5. Values of voltage drop on the sample

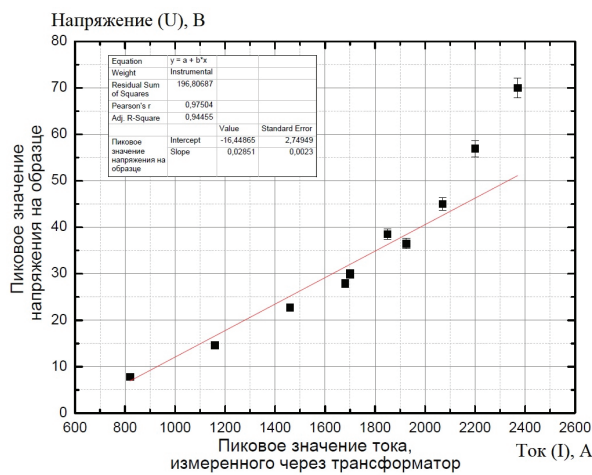


Рис. 6. Зависимость пиковых значений напряжения на образце от пикового значения тока, измеренного через трансформатор
Fig. 6. Dependence of peak voltage values on the sample on the peak current value measured through the transformer

Результаты экспериментов

В ходе эксперимента были измерены значения токов и падений напряжения на образце в виде медной проволоки. Напряжения были измерены и записаны при помощи осциллографа АКИП-4115/3А в виде таблиц в формате CSV с частотой дискретизации 2,5 млн точек в секунду.

Предварительная обработка данных осуществлялась при помощи специально написанной программы. Программа учитывает смещение нуля показаний осциллографа, умножает данные на коэффициент, заданный пользователем, а также усредняет их по 11 точкам.

Результаты измерений значения тока, падения напряжения на образце и зависимость пиковых значений напряжения на образце от пикового значения тока показаны на рис. 4–6.

Значение сопротивления образца можно оценить в $0,029 \pm 0,007$ (Ом). Значения проводимости образца можно оценить в 34 ± 8 (См). Тогда можно рассчитать теоретическое значение сопротивления медного образца длиной в 380 мм и диаметром в 0,5 мм по формуле:

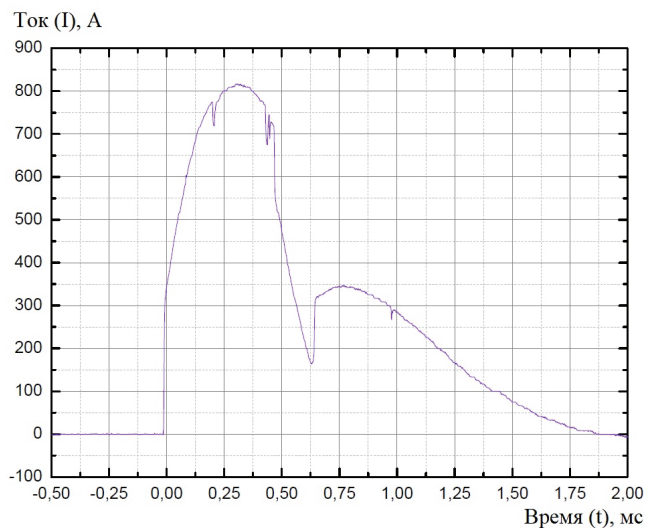


Рис. 7. Значения тока с учетом перенормировки данных для падения напряжения на образце
Fig. 7. Current values with data renormalisation for the voltage drop across the sample

$$R_{\text{образца}} = \frac{\rho l}{S} = \frac{4\rho l}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 0,0175 \left(\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}} \right) \cdot 0,38(\text{м})}{3,14159 \cdot 0,25(\text{мм}^2)} = 0,034(\text{Ом}).$$

Произведя перенормировку данных для падения напряжения на образце по пиковому значению тока, полученного на трансформаторе, получим искомые значения тока на рис. 7.

Численно проинтегрировав значения тока, используя формулу Симпсона, можно оценить с погрешностью для осциллографа не более 3% накопленный конденсаторами заряд в $0,612 \pm 0,015$ (Кл). Тогда можно оценить значение емкости конденсатора:

$$C = \frac{q}{U} = \frac{0,612(\text{Кл})}{21(\text{В})} = 29143(\text{мкФ}),$$

что даст погрешность в 557 мкФ (менее 2%) при суммарной емкости конденсаторов в 29 700 мкФ.

Заключение

Авторам удалось достаточно корректно измерить пиковые значения токов, протекающих через образец, с помощью отклика трансформатора тока, однако форма сигнала отображалась на этом отклике некорректно. Поэтому было принято решение использовать в качестве низкоомного шунта сам образец исследования – медную проволоку, предполагая, что падение напряжения на этом шунте будет близко к значению, определяемому через закон Ома. Но заметим, что ток и напряжение на образце могут не подчиняться линейному закону Ома, поскольку в процессе пропускания тока через образец изменяется и его внутренняя структура, о чем свидетельствует присутствие электропластического эффекта, который наблюдался с помощью подвесов. В свою очередь, это может приводить к изменению моментальных значений сопротивления в образце. Данные вопросы требуют дополнительного исследования. Для решения этих проблем можно использовать анализ Фурье [12] для минимизации паразитных спектральных компонент. Возможно использование дополнительных датчиков, например, датчиков Холла. Также имеет смысл использования обобщенной теоремы о циркуляции магнитного поля вместо применяемого здесь частотного следствия для стационарного случая.

Л и т е р а т у р а

1. Обзор последних достижений в области электропластической обработки металлов давлением / Д. У. Абдуллина, Ю. В. Бебихов, П. С. Татаринов, С. В. Дмитриев // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2023. – Т. 20. – № 4. – С. 469–483. EDN: UKFDAM. DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.04.006.
2. Давыдов, А. Д. Электрохимическая размерная обработка металлов: процесс формообразования / А. Д. Давыдов, В. М. Волгин, В. В. Любимов // *Электрохимия*. – 2004. – Т. 40. – № 12. – С. 1438–1480. EDN: OXEOVN.
3. Стариковский, А. Ю. Управление газодинамическими потоками с помощью сверхбыстрого локального нагрева в сильнонеравновесной импульсной плазме / А. Ю. Стариковский, Н. Л. Александров // *Физика плазмы*. – 2021. – Т. 47. – № 2. – С. 126–192. EDN: WMKRIZ. DOI: 10.31857/S0367292121020062.
4. Фортов, В. Е. Экстремальные состояния вещества на земле и в космосе / В. Е. Фортов // *Успехи физических наук*. – 2009. – Т. 179. – № 6. – С. 653–687. EDN: KHPNNB.
5. О реализации дополнительных функций установок для испытания силовых полупроводниковых приборов импульсным током / С. В. Аникуев, Е. И. Костюкова, Г. В. Никитенко, И. К. Шарипов // *Электротехника*. – 2021. – № 7. – С. 42–46. EDN: RDBUEU.
6. Баранов, М. И. Особенности проявления и влияния на электромагнитные процессы нестационарного поверхностного эффекта в металлических проводниках с импульсным током / М. И. Баранов // *Электротехника и электромеханика*. – 2019. – № 4. – С. 41–47. EDN: CELJLH. DOI: 10.20998/2074-272X.2019.4.06.
7. Бедрин, А. Г. Использование волоконно-оптического датчика для регистрации импульсного тока плазменного разряда / А. Г. Бедрин, А. Н. Жилин, И. Л. Ловчий // *Измерительная техника*. – 2021. – № 9. – С. 28–34. EDN: KHVNB1. DOI: 10.32446/0368-1025it.2021-9-28-34.
8. Лебедев, В. Д. Исследование погрешностей измерения тока поясом Роговского на основе математического и физического моделирования / В. Д. Лебедев, А. А. Яблоков, А. Е. Нестерихин // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. – 2013. – № 6. – С. 30–34. EDN: RRYZSN.
9. Применение импульсного тиратрона для коммутации гатчинского разряда / Д. Ч. Ким, А. С. Семенов, Ю. В. Бебихов, П. С. Татаринов // *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова*. – 2022. – № 3 (89). – С. 27–38. EDN: THPVCB. DOI: 10.25587/SVFU.2022.12.81.003.
10. Разработка и испытание установки для изучения лабораторного аналога шаровой молнии / Д. Ч. Ким, А. С. Семенов, Ю. В. Бебихов [и др.] // *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова*. – 2020. – № 6 (80). – С. 34–47. EDN: EYQQNT. DOI: 10.25587/SVFU.2020.80.6.002.
11. Костиков, В. Г. Источники электропитания электронных средств : Схемотехника и конструирование : учебник для вузов / В. Г. Костиков, Е. М. Парфенов, В. А. Шахнов. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2001. – 344 с.
12. Устройство для измерения больших токов // Патент на изобретение RU 2580410 C1, 10.04.2016. Заявка № 2014154526/28 от 31.12.2014 / П. Ф. Баранов, Ю. С. Боровиков, А. И. Заревич [и др.]. EDN: IWLHOO.

References

1. Abdullina, D.U., Bebikhov, Yu.V., Tatarinov, P.S. and Dmitriev, S.V. (2023). Review of recent achievements in the field of electroplastic metal forming. *Basic problems of Material Science*, 20(4), pp. 469–483.
2. Davydov, A.D., Volgin, V.M. and Liubimov, V.V. (2004). Electrochemical dimensional treatment of metals: shaping process. *Electrochemistry*, 40(12), pp. 1438–1480.
3. Starikovskiy, A.Yu. and Aleksandrov, N.L. (2021). Control of gas-dynamic flows by ultrafast local heating in strongly nonequilibrium pulsed plasma. *Plasma Physics*, 47(2), pp. 126–192.

4. Fortov, V.E. (2009). Extreme states of matter on earth and in space. *Successions of physical sciences*, 179(6), pp. 653–687.
5. Anikuev, S.V., Kostiukova, E.I., Nikitenko, G.V. and Sharipov, I.K. (2021). About realisation of additional functions of installations for testing of power semiconductor devices by pulse current. *Electrotechnics*, 7, pp. 42–46.
6. Baranov, M.I. (2019). Peculiarities of manifestation and influence on electromagnetic processes of the unsteady surface effect in metal conductors with a pulse current. *Electrical Engineering and Electromechanics*, 4, pp. 41–47.
7. Bedrin, A.G., Zhilin, A.N. and Lovchii, I.L. (2021). Use of a fibre-optic sensor for registration of a pulse current of a plasma discharge. *Measuring technology*, 9, pp. 28–34.
8. Lebedev, V.D., Yablokov, A.A., Nesterikhin, A.E. (2013). Investigation of current measurement errors with Rogovsky belt based on mathematical and physical modelling. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 6, pp. 30–34.
9. Kim, D.Ch., Semenov, A.S., Bebikhov, Yu.V. and Tatarinov, P.S. (2022). Application of pulsed thyatron for switching of Gatchina discharge. *Vestnik of NEFU*, 3(89), pp. 27–38.
10. Kim, D.Ch., Semenov, A.S., Bebikhov, Yu.V., Efimov, V.A., Spiridonov, V.M., Tatarinov, P.S. (2020). Development and testing of a setup for studying a laboratory analogue of ball lightning. *Vestnik of NEFU*, 6(80), pp. 34–47.
11. Kostikov, V.G., Parfenov, E.M. and Shakhnov, V.A. (2001). *Electronic Power Supplies: Circuit Engineering and Design: Textbook for Universities*. Moscow: Goriachaia liniia-Telekom, 344 p.
12. Baranov, P.F., Borovikov, Yu.S., Zarevich, A.I., Muravyev S.V. and Sulaimanov, A.O. (2016). *Device for measuring large currents*. Pat. RU 2580410 C1.

ТАТАРИНОВ Владимир Павлович – студент 2 курса группы Б-ПМ-22, Политехнический институт (филиал) СВФУ им. М.К. Аммосова.

E-mail: vovatarinov@bk.ru

TATARINOV Vladimir Pavlovich – 2-nd year Student of group B-PM-22, Polytechnic Institute (branch), M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.

ТАТАРИНОВ Павел Семенович – ст. преп. каф. ЭиАПП, Политехнический институт (филиал) СВФУ им. М.К. Аммосова.

E-mail: paveltatarinov@mail.ru

TATARINOV Pavel Semenovich – Senior Lecturer of the Department of Electrification and Automation of Industrial Production, Polytechnic Institute (branch), M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.

БЕБИХОВ Юрий Владимирович – к. ф.-м. н., доц. каф. ЭиАПП, Политехнический институт (филиал) СВФУ им. М.К. Аммосова.

E-mail: bebikhov.yura@mail.ru

БЕБИХОВ Yuriy Vladimirovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrification and Automation of Industrial Production, Polytechnic Institute (branch), M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.

СЕМЁНОВ Александр Сергеевич – д. ф.-м. н., доцент, директор, Политехнический институт (филиал) СВФУ им. М.К. Аммосова.

E-mail: sash-alex@yandex.ru

SEменов Aleksandr Sergeevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Director, Polytechnic Institute (branch), M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.

ДМИТРИЕВ Сергей Владимирович – д. ф.-м. н., проф., зав. лаб. физики молекул и кристаллов, Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН; в. н. с., Институт проблем сверхпластичности металлов РАН.

E-mail: dmitriev.sergey.v@gmail.com

DMITRIEV Sergey Vladimirovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Molecular and Crystal Physics, Institute of Molecule and Crystal Physics UFRC RAS, Leading Researcher of IMSP RAS.