



Оригинальная статья

УДК 621.316

DOI 10.17073/0368-0797-2021-6-435-441



## МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПАРАМЕТРАМИ ЭЛЕКТРОСТИМУЛИРУЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

В. А. Кузнецов, Е. С. Кузнецова, В. Е. Громов

■ Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

**Аннотация.** Технологии обработки давлением металлической заготовки с использованием мощных импульсов тока приобретают все большее распространение и в России, и за рубежом. Уникальные электромеханические процессы изучаются и совершенствуются в лабораторных и производственных условиях. Процесс воздействия электрического тока на заготовку сопровождается изменением ее физических свойств в результате так называемого электропластического эффекта (ЭПЭ). Одновременно повышается температура заготовки в зоне деформации. Для качественной и надежной работы волочильного стана при электростимулированном волочении (ЭСВ) необходимо применять систему автоматики для регулирования усилия и температуры. С целью реализации контура регулирования температуры требуется синтезировать передаточную функцию объекта регулирования – стальной проволоки, обрабатываемой давлением (прокатка или волочение). Рассмотрен синтез и анализ параметров модели объекта регулирования температуры. Используются известные соотношения: зависимость мощности генератора импульсов от рассчитанных параметров (начальной температуры, диаметра, удельного веса и электрического сопротивления заготовки, длительности импульса); зависимость среднеквадратичного тока генератора от амплитуды и частоты воспроизведения импульсов; зависимость магнитной проницаемости заготовки от ее температуры; зависимость удельного электрического сопротивления материала проводника от температуры. В среде «MATLAB – Simulink» синтезирована модель объекта регулирования температуры как функции от параметров генератора мощных токовых импульсов (амплитуды и частоты), а также параметров обрабатываемой заготовки (диаметра, длины образца, линейной скорости, начальной температуры, удельного сопротивления при начальной температуре). Выполнен анализ модели, приведены переходные процессы при различных режимах работы. С использованием разработанной модели получены зависимости температуры, мощности и эквивалентного сопротивления от параметров генератора и заготовки при различных частотах импульсов генератора и диаметрах заготовки. Разработанная модель может быть использована для лабораторных исследований электропластического эффекта, а также в производстве в системах автоуправления электростимулированным волочением с целью реализации объекта регулирования в виде модели.

**Ключевые слова:** генератор мощных импульсов тока, система автоматического регулирования параметров генератора, модель нагрева металлической заготовки, объект регулирования, передаточная функция объекта регулирования

**Для цитирования:** Кузнецов В.А., Кузнецова Е.С., Громов В.Е. Модель объекта регулирования температуры параметрами электростимулирующего воздействия // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 6. С. 435–441. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-6-435-441>

Original article

## MODEL OF THE OBJECT UNDER TEMPERATURE CONTROL BY ELECTROSTIMULATING ACTION PARAMETERS

V. A. Kuznetsov, E. S. Kuznetsova, V. E. Gromov

■ Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

**Abstract.** Technologies for pressure treatment of metal workpieces using powerful current pulses are becoming increasingly widespread both in Russia and abroad. Unique electromechanical processes are studied and improved in laboratory and production conditions. The process of applying an electric current to the workpiece is accompanied by a change in its physical properties as a result of the so-called electroplastic effect (EPE). At the same time, the temperature of the workpiece in the deformation zone increases. For high-quality and reliable operation of the drawing mill with electrostimulated drawing (ESW), it is necessary to use an automatic system for regulating the force and temperature. In order to implement the temperature control circuit, it is necessary to synthesize the transfer function of the control object – steel wire processed by pressure (rolling or drawing). Synthesis and analysis of parameters of the model of temperature control object are considered. The known relations are used: dependence of the pulse generator power on the calculated parameters (initial temperature, diameter, specific weight and electrical resistance of the workpiece, pulse duration); dependence of the RMS current of the generator on the amplitude and frequency of pulse reproduction; dependence of the magnetic permeability of the workpiece on its temperature; and dependence of the specific electrical resistance of the conductor material on temperature. In MATLAB – Simulink medium, a model

of the temperature control object is synthesized as a function of the parameters of generator of high-power current pulses (amplitude and frequency), as well as the parameters of the workpiece to be processed (diameter, sample length, linear velocity, initial temperature, and resistivity at the initial temperature). The model is analyzed, and transients under different operating modes are presented. Using the developed model, the dependences of the temperature, power, and equivalent resistance on parameters of the generator and the workpiece are obtained for different generator pulse frequencies and workpiece diameters. The developed model can be used for laboratory studies of the electroplastic effect, as well as in production in auto-control systems with electrostimulated drawing in order to implement the object of regulation in the form of a model.

**Keywords:** generator of powerful current pulses, system of automatic control of generator parameters, model of metal workpiece heating, control object, transfer function of control object

**For citation:** Kuznetsov V.A., Kuznetsova E.S., Gromov V.E. Model of the object of temperature control by electrostimulating action parameters. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 6, pp. 435–441. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-6-435-441>

## ВВЕДЕНИЕ

Последнее десятилетие внимание исследователей и технологов в областях физического материаловедения и обработки металлов привлечено к изучению механизмов влияния электрических полей и токов, а также к практическому использованию эффектов пластификации металлов и сплавов в современных процессах формоизменения. Появился даже специальный термин – *electrically assisted manufacturing* (EAM): производство с использованием электричества [1]. Такая обработка включает в себя волочение, прокатку, ковку, штамповку и новые разрабатываемые технологии [2 – 12]. В отечественной практике наибольшее распространение получило электростимулированное волочение (ЭСВ) [13], в основу которого положено использование импульсных электрических токов с различными параметрами частоты, длительности, плотности. Ведутся интенсивные поиски интерпретации наблюдаемых эффектов и выявления их физической природы [1, 13].

Технология электростимулированного волочения [13] основана на применении генераторов мощных токовых импульсов (ГИ). Современные генераторы с целью экономичности, быстродействия, безопасности и качественных параметров технологии содержат зарядное устройство с использованием тиристорных преобразователей и систему автоуправления параметрами: частотой и амплитудой импульсов [14, 15].

Особое внимание должно быть уделено электрическим контактам, обеспечивающим надежную передачу электрической энергии от генератора импульсов в зону деформации [16, 17]. Стабильный процесс ЭСВ должен быть обеспечен высококачественной и быстродействующей системой автоматического регулирования (САР) параметров волочения [18]. Для реализации контура регулирования температуры требуется рассчитать передаточную функцию параметров объекта регулирования, прежде всего температуры и усилия волочения. При ЭСВ объектом регулирования является стальная проволока.

Одной из проблем САР является измерение температуры в зоне деформации. Использование термодатчиков недопустимо из-за их инерционности, а фотодатчики и другие электронные устройства работают крайне не-

надежно из-за мощных помех, возникающих в процессе прохождения импульсов, а также возможного искрения и образования окалина, что требует постоянной чистки окна датчика. Одним из возможных решений проблемы является использование вместо реального объекта регулирования его модели.

Целью настоящей работы является синтез и анализ модели объекта регулирования температуры.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА

### РЕГУЛИРОВАНИЯ И СИНТЕЗ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ

При воздействии на металлическую заготовку электрическим током электрическая энергия превращается в тепловую. После достижения заготовкой температуры окружающей среды ее тепло передается в окружающую среду (конвекцией, лучеиспусканием, теплопроводностью).

Основные расчеты динамического режима нагрева объекта регулирования (обрабатываемой проволоки) представлены ниже [19, 20].

Полная мощность  $P$ , используемая для нагрева заготовки, определяется по зависимости

$$P = P_{\text{пол}} + P_{\text{п}},$$

где  $P_{\text{пол}} = mc_p \frac{t_2^\circ - t_1^\circ}{\tau}$  – полезная мощность, используемая для нагрева заготовки, Вт;  $m$  – масса, кг;  $c_p$  – теплоемкость, Дж/(кг·К);  $(t_2^\circ - t_1^\circ)$  – разность начальной и конечной температур, °С;  $\tau$  – время нагрева, с;  $P_{\text{п}} = P_k + P_{\text{и}} + P_t$  – мощность потерь, Вт;  $P_k = 3,5 \cdot 10^{-4} F \frac{\Delta T^{5/4}}{d^{1/2}}$  – потери

конвекцией, Вт;  $P_{\text{и}} = 5,7 \epsilon_0 \left[ \left( \frac{T_2^\circ}{1000} \right)^4 - \left( \frac{T_1^\circ}{1000} \right)^4 \right] F$  – потери излучением, Вт;  $P_t$  – потери теплопроводностью, Вт;  $F$  – площадь поверхности, см<sup>2</sup>;  $T$  – температура, К;  $\epsilon_0$  – коэффициент черноты излучения [19];  $d$  – диаметр заготовки, см;  $m = \rho_{\text{п}} V$ ;  $\rho_{\text{п}}$  – плотность, г/см<sup>3</sup>;

$V$  – объем заготовки, см<sup>3</sup>;  $V = \frac{\pi d^2}{4} L$ , см<sup>3</sup>;  $P = I_{\text{ср.кв}} R_z$ , Вт;  $I_{\text{ср.кв}}$  – среднеквадратичный ток через заготовку, А;  $R_z$  – эквивалентное сопротивление заготовки, Ом.

Для упрощения расчетов форма импульса генератора принята синусоидальной, длительность импульса 75 мкс, максимальное значение амплитуды 8 – 10 кА (эти величины постоянные):

$$I_{\text{ср. кв}} = \sqrt{\frac{\int_0^{T/2} A^2 (\sin \omega t)^2 dt}{T}} = \frac{A}{2} \sqrt{T_0 f}, \text{ A}; \quad (1)$$

$$I_{\text{ср. кв}}^2 = \frac{A^2}{4} f. \quad (2)$$

## МОДЕЛИРОВАНИЕ

По полученным зависимостям синтезирована модель блока, реализующего зависимость среднеквадратичного тока  $I_{\text{ср. кв}}$  генератора от частоты воспроизведения импульсов  $f$  генератора.

На основании формул получена следующая зависимость мощности генератора от рассчитанных параметров:

$$P = I_{\text{ср. кв}}^2 R_{\text{э}} = mc_p \frac{t_2^\circ - t_1^\circ}{\tau} + 5,7\varepsilon_0 \left[ \left( \frac{T_2^\circ}{1000} \right)^4 - \left( \frac{T_1^\circ}{1000} \right)^4 \right] F + 3,5 \cdot 10^{-4} F \frac{\Delta T^{5/4}}{d^{1/2}}.$$

В программе в качестве постоянных величин используются следующие параметры:

- $T_2$  – начальная температура заготовки, К;
- $d$  – диаметр заготовки, см;
- $\rho$  – плотность металлической заготовки, г/см<sup>3</sup>;
- $R$  – электрическое сопротивление заготовки, Ом;
- $T_0/2$  – длительность мощного электрического импульса, сформированного генератором импульсного тока, мкс.

Для расчета температуры в зоне деформации необходимо на вход модели подать величину  $A$  амплитуды импульса  $Amp$ , частота воспроизведения импульсов  $f$ . В блоке В1 производится вычисление тока генератора в соответствии с приведенными выше зависимостями.

Известно, что при протекании импульсного тока через проводник возникает два значимых эффекта, которые изменяют постоянную величину сопротивления. В момент прохождения импульсного тока через металлическую заготовку из-за ослабления магнитного поля у поверхности проводника ток вытесняется к поверхности, встречая ближе к центру проводника более высокое индуктивное сопротивление. Вышеуказанный эффект называют поверхностным или скин-эффектом, который приводит к неравномерному нагреву деталей: поверхностные слои нагреваются более интенсивно, а центр заготовки нагревается незначительно из-за теплопроводности стали.

Глубина проникновения тока в металл (толщина поверхностного слоя) определяется по формуле [21, 22]:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu_B f}} = \sqrt{\frac{\rho 2T_i}{\mu_B}}, \quad (3)$$

где  $f$  – частота колебаний импульсного тока, Гц;  $\mu_B$  – магнитная проницаемость материала проводника, Гн/м;  $T_i$  – длительность (полупериод) импульса тока, с;  $\delta$  – глубина проникновения тока в проводнике, м.

С повышением температуры нагрева глубина проникновения тока увеличивается, достигая максимальной величины при температуре потери магнитных свойств заготовки – так называемой «точки Кюри».

Магнитная проницаемость при температурах выше 700 – 750 °С почти не зависит от температуры заготовки, достигая минимальной величины магнитной проницаемости вакуума  $\mu_0 = 1$  (рис. 1).

Для аппроксимации зависимости  $m = f(t)$  смоделирован блок В3 (рис. 2), содержащий ячейку Fcn5 математических расчетов, реализующую зависимость  $y = f(x)$ , а также блок SD ограничения, реализующий функции  $y = 16$ ,  $y = 1$ .

Таким образом определяется следующая технология нагрева заготовки с использованием импульсного тока: сначала происходит интенсивный нагрев стали в небольшом поверхностном слое, равном глубине проникновения тока в холодный металл; далее, после потери этим слоем магнитных свойств, глубина проникновения тока возрастает и нагревается слой, расположенный глубже, при этом нарастание температуры в первом нагретом слое замедляется.

При изменении температуры изменяется также и удельное электрическое сопротивление материала проводника  $\rho$ :

$$\rho_t = \rho_{t1} [1 + \alpha(t - t_1)], \quad (4)$$

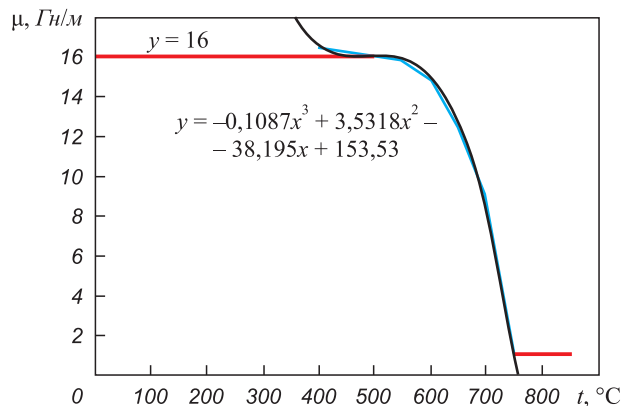


Рис. 1. Изменение магнитной проницаемости в зависимости от температуры нагрева

Fig. 1. Change in magnetic permeability as a function of heating temperature

где  $\rho_{t1}$  – удельное сопротивление металлической заготовки при начальной температуре  $t_1$  (обычно 20 °С), Ом·м;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления.

В блоке В3 вычисляется эквивалентное сопротивление заготовки  $R_z$  в функции  $\mu$ ,  $t$  в соответствии с формулами (3), (4), в блоке В4 – мощность генератора импульсов.

При нагреве заготовки процессы изменения магнитной проницаемости  $\mu$  и удельного электрического сопротивления  $\rho$  заготовки из стали происходят одновременно, значительно изменяя величину эквивалентного сопротивления заготовки в зависимости от температуры и времени.

На основании зависимостей (рис. 1) синтезирована модель блока, реализующего изменение температуры заготовки длиной  $l$  поперечным сечением  $S$  при начальной температуре окружающей среды ( $t_1$ ) 20° С от среднеквадратичного тока.

Обобщенная модель САР, в состав которой входят блоки 1 – 4, представлена на рис. 2. Входными параметрами являются:  $T_2$  – начальная температура заготовки, К;  $d$  – диаметр заготовки, см;  $\rho$  – плотность

металлической заготовки, г/см<sup>3</sup>;  $R$  – электрическое сопротивление заготовки, Ом;  $T_0/2$  – длительность мощного электрического импульса, сформированного генератором импульсного тока, мкс.

На рис. 3 приведены зависимости температуры, мощности и эквивалентного сопротивления объекта регулирования от параметров генератора и заготовки при различных частотах импульсов генератора и диаметрах заготовки, полученные с использованием разработанной модели. Зоны нерабочего состояния заготовки (выше температуры ее плавления) показаны штриховыми линиями.

## Выводы

В среде «Matlab – Simulink» разработана имитационная модель объекта регулирования температуры металлической заготовки при воздействии на нее импульсов тока в функции параметров генератора импульсов и заготовки. Для синтеза модели использованы известные уравнения динамического режима нагрева объекта регулирования при воздействии на нее электрического

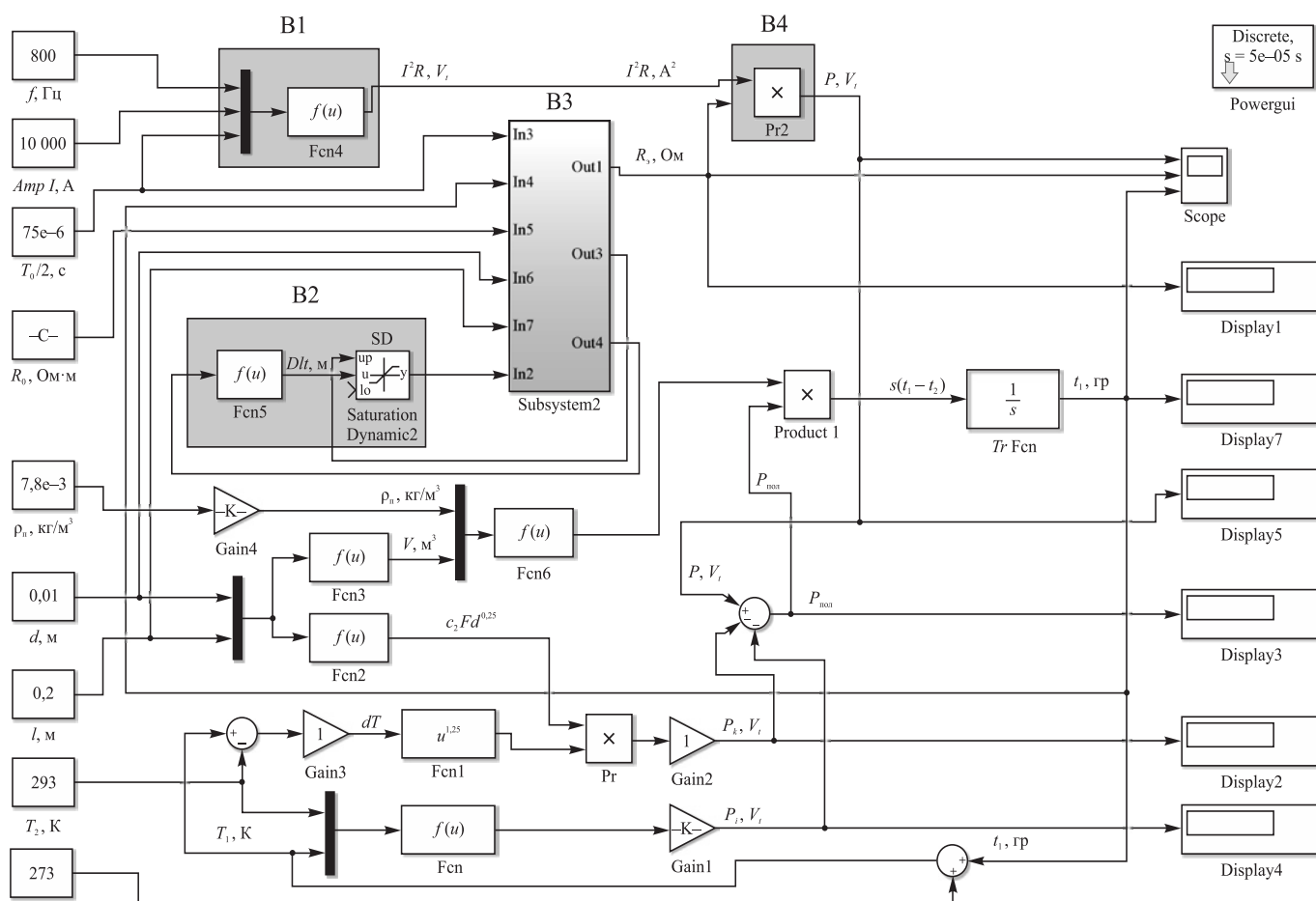


Рис. 2. Модель блока В, реализующего зависимость температуры заготовки от параметров заготовки и генератора импульсов в среде «MATLAB – Simulink»

Fig. 2. Model of block B, which implements dependence of the workpiece temperature on parameters of the workpiece and pulse generator in MATLAB – Simulink medium



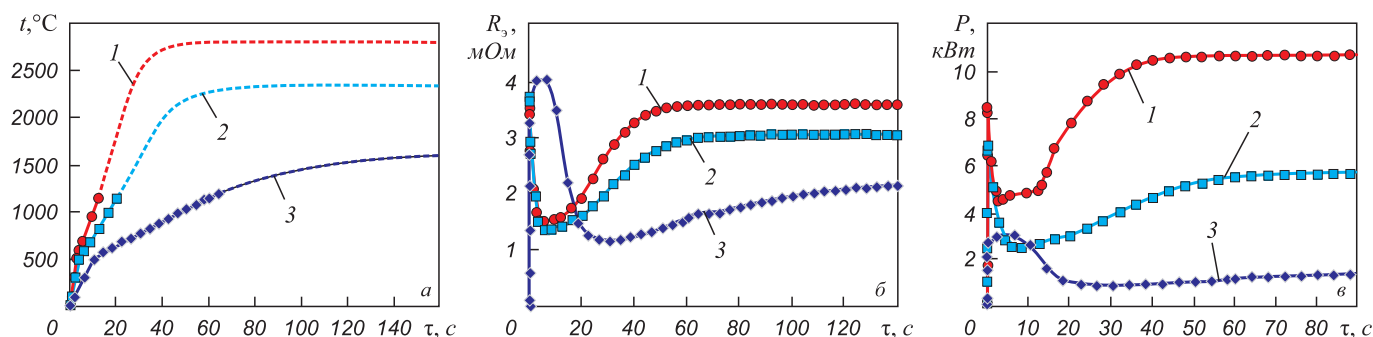


Рис. 3. Зависимость температуры (а), эквивалентного сопротивления (б) и мощности генератора (в) от времени при частоте воспроизведения импульсов 800 Гц (1), 500 Гц (2) и 200 Гц (3) (диаметр заготовки 10 мм)

Fig. 3. Dependence of temperature (a), equivalent resistance (b) and generator power (c) on time at pulse reproduction frequency of 800 Hz (1), 500 Hz (2) and 200 Hz (3) (the workpiece diameter is 10 mm)

тока, зависимость среднеквадратичного тока генератора от амплитуды и частоты воспроизведения импульсов, изменение под действием температуры глубины проникновения тока в металл и его удельного сопротивления. В результате анализа модели построены переходные процессы температуры, удельного сопротивления заготовки и мощности генератора.

Модель может найти применение для лабораторных исследований электропластического эффекта, при проектировании, для определения мощности источника тока в зависимости от параметров заготовки и температуры, а также в производстве в системах автоматического регулирования процесса ЭСВ с целью использования вместо реального объекта регулирования его модели.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

#### REFERENCES

- Hong S.-T., Jeong Y.-H., Chowdhury M.N., Chun D.-M., Kim M.-J., Han H.N. Feasibility of electrically assisted progressive forging of aluminum 6061-T6 alloy // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 64. No. 1. P. 277–280. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.084>
- Perkins T.A., Kronenberger T.J., Roth J.T. Metallic forging using electrical flow as an alternative to warm/hot working // *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2007. Vol. 129. No. 1. P. 84–94. <https://doi.org/10.1115/1.2386164>
- Egea A.J.S., Rojas H.A.G., Celentano D.J., Peiró J.J. Mechanical and metallurgical changes on 308L wires drawn by electropulses // *Materials & Design*. 2016. Vol. 90. P. 1159–1169. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.11.067>
- Tang G., Zhang J., Zheng M., Zhang J., Fang W., Li Q. Experimental study of electroplastic effect on stainless steel wire 304L // *Materials Science and Engineering: A*. 2000. Vol. 281. No. 1-2. P. 263–267. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00708-X](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00708-X)
- Hameed S., Rojas H.A.G., Egea A.J.S., Alberro A.N. Electroplastic cutting influence on power consumption during drilling process // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 87. No. 5-8. P. 1835–1841. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8562-z>
- Zhang D., To S., Zhu Y.H., Wang H., Tang G.Y. Static electropulsing-induced microstructural changes and their effect on the ultra-precision machining of cold-rolled AZ91 alloy // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2012. Vol. 43. No. 4. P. 1341–1346. <https://doi.org/10.1007/s11661-011-0955-x>
- Langer J., Hoffmann M.J., Guillon O. Direct comparison between hot pressing and electric field-assisted sintering of submicron alumina // *Acta Materialia*. 2009. Vol. 57. No. 18. P. 5454–5465. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.07.043>
- Munir Z.A., Quach D.V., Ohyanagi M. Electric current activation of sintering: A review of the pulsed electric current sintering process // *Journal of the American Ceramic Society*. 2011. Vol. 94. No. 1. P. 1–19. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2010.04210.x>
- Hong S.-T., Jeong Y.-H., Chowdhury M.N., Chun D.-M., Kim M.-J., Han H.N. Feasibility of electrically assisted progressive forging of aluminum 6061-T6 alloy. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2015, vol. 64, no. 1, pp. 277–280. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.084>
- Perkins T.A., Kronenberger T.J., Roth J.T. Metallic forging using electrical flow as an alternative to warm/hot working. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2007, vol. 129, no. 1, pp. 84–94. <https://doi.org/10.1115/1.2386164>
- Egea A.J.S., Rojas H.A.G., Celentano D.J., Peiró J.J. Mechanical and metallurgical changes on 308L wires drawn by electropulses. *Materials & Design*. 2016, vol. 90, pp. 1159–1169. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.11.067>
- Tang G., Zhang J., Zheng M., Zhang J., Fang W., Li Q. Experimental study of electroplastic effect on stainless steel wire 304L. *Materials Science and Engineering: A*. 2000, vol. 281, no. 1-2, pp. 263–267. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00708-X](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00708-X)
- Hameed S., Rojas H.A.G., Egea A.J.S., Alberro A.N. Electroplastic cutting influence on power consumption during drilling process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016, vol. 87, no. 5-8, pp. 1835–1841. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8562-z>
- Zhang D., To S., Zhu Y.H., Wang H., Tang G.Y. Static electropulsing-induced microstructural changes and their effect on the ultra-precision machining of cold-rolled AZ91 alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2012, vol. 43, no. 4, pp. 1341–1346. <https://doi.org/10.1007/s11661-011-0955-x>
- Langer J., Hoffmann M.J., Guillon O. Direct comparison between hot pressing and electric field-assisted sintering of submicron alumina. *Acta Materialia*. 2009, vol. 57, no. 18, pp. 5454–5465. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.07.043>
- Munir Z.A., Quach D.V., Ohyanagi M. Electric current activation of sintering: A review of the pulsed electric current sintering process. *Journal of the American Ceramic Society*. 2011, vol. 94, no. 1, pp. 1–19. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2010.04210.x>

9. Santos T.G., Miranda R., Vilaca P. Friction stir welding assisted by electrical joule effect // *Journal of Materials Processing Technology*. 2014. Vol. 214. No. 10. P. 2127–2133. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.03.012>
10. Santos T.G., Lopes N., Machado M., Vilaca P., Miranda R.M. Surface reinforcement of AA5083-H111 by friction stir processing assisted by electrical current // *Journal of Materials Processing Technology*. 2015. Vol. 216. P. 375–380. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.10.005>
11. Jeswiet J., Micari F., Hirt G., Bramley A.N., Dufloy J., Allwood J. Asymmetric single point incremental forming of sheet metal // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2005. Vol. 54. No. 2. P. 88–114. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60021-3](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60021-3)
12. Fan G., Sun F., Meng X., Gao L., Tong G. Electric hot incremental forming of Ti-6Al-4V titanium sheet // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2010. Vol. 49. P. 941–947. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2472-2>
13. Электростимулированная пластичность металлов и сплавов / В.Е. Громов, А.В. Зувев, Э.В. Козлов, В.Я. Целлермаер. М.: Недра, 1996. 289 с.
14. А.с. № 884092 СССР. Генератор мощных импульсов тока / Кузнецов В.А., Громов В.Е., Симаков В.П.; заявл. 26.03.80; опубл. 23.11.81. Бюл. № 43.
15. Кузнецов В.А., Полковников Г.Д., Громов В.Е., Кузнецова Е.С., Перегудов О.А. Генератор мощных импульсов тока с использованием реверсивного тиристорного преобразователя // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019. Т. 62. № 12. С. 964–971. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-12-964-971>
16. Алиферов А., Лупи С. Индукционный и электроконтактный нагрев металлов. Новосибирск: изд. НГТУ, 2011. 411 с.
17. А.с. № 232995 СССР. Контактующее устройство для подвода электрического тока / Кашин Ю.А., Кулаченков Г.П.; заявл. 21.03.1967; опубл. 18.12.1968. Бюл. № 2. 1969.
18. Кузнецов В.А., Полковников Г.Д., Кузнецова Е.С., Громов В.Е. Разработка системы автоматического управления электростимулированным волочением с использованием мощных импульсов тока // *Труды восьмой всероссийской научно-практической конференции*. Новокузнецк. 20 – 21 ноября 2018. Новокузнецк: СибГИУ, 2018. С. 132–138.
19. Коврев Г.С. Электроконтактный нагрев при обработке цветных металлов. М.: Металлургия, 1975. 312 с.
20. Романов Д.И. Электроконтактный нагрев металлов. М.: Машиностроение, 1981. 168 с.
21. Слухоцкий А.Е., Немков В.С., Павлов Н.А., Бамунер А.В. Установки индукционного нагрева / Под ред. А.Е. Слухоцкого. Л.: Энергоиздат, Ленинградское отделение, 1981. 328 с.
22. Смирнов М.А., Счастливцев В.М., Журавлев Л.Г. Основы термической обработки стали. М.: Наука и технологии, 2002. 519 с.
9. Santos T.G., Miranda R., Vilaca P. Friction stir welding assisted by electrical joule effect. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014, vol. 214, no. 10, pp. 2127–2133. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.03.012>
10. Santos T.G., Lopes N., Machado M., Vilaca P., Miranda R.M. Surface reinforcement of AA5083-H111 by friction stir processing assisted by electrical current. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015, vol. 216, pp. 375–380. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.10.005>
11. Jeswiet J., Micari F., Hirt G., Bramley A.N., Dufloy J., Allwood J. Asymmetric single point incremental forming of sheet metal. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2005, vol. 54, no. 2, pp. 88–114. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60021-3](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60021-3)
12. Fan G., Sun F., Meng X., Gao L., Tong G. Electric hot incremental forming of Ti-6Al-4V titanium sheet. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2010, vol. 49, pp. 941–947. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2472-2>
13. Gromov V.E., Zuev A.V., Kozlov E.V., Tsellermaer V.Ya. *Electro-stimulated Plasticity of Metals and Alloys*. Moscow: Nedra, 1996, 289 p. (In Russ.).
14. Kuznetsov V.A., Gromov V.E., Simakov V.P. *Generator of powerful current pulses*. Certificate of authorship USSR no. 884092. *Byulleten' izobretenii*. 1981, no. 43. (In Russ.).
15. Kuznetsov V.A., Polkovnikov G.D., Gromov V.E., Kuznetsova V.A., Peregudov O.A. High power current pulse generator based on reversible thyristor converter. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 12, pp. 964–971. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-12-964-971>
16. Aliferov A., Lupi S. *Induction and Electric Contact Heating of Metals*. Novosibirsk: izd. NSTU, 2011, 411 p. (In Russ.).
17. Kashin Yu.A., Kulachenkov G.P. *Contact device for electric current supply*. Certificate of authorship USSR no. 232995. *Byulleten' izobretenii*. 1969, no. 2. (In Russ.).
18. Kuznetsov V.A., Polkovnikov G.D., Kuznetsova E.S., Gromov V.E. Development of an automatic control system for electrostimulated drawing using powerful current pulses. In: *Proceedings of the 8<sup>th</sup> All-Russ. Sci. and Pract. Conf. Novokuznetsk. November 20-21, 2018*. Novokuznetsk: SibSIU, 2018, pp. 132–138. (In Russ.).
19. Kovrev G.S. *Electric Contact Heating in Non-Ferrous Metals Processing*. Moscow: Metallurgiya, 1975, 312 p. (In Russ.).
20. Romanov D.I. *Electric Contact Heating of Metals*. Moscow: Mashinostroenie, 1981, 168 p. (In Russ.).
21. Slukhotskii A.E., Nemkov V.S., Pavlov N.A., Bamuner A.V. *Induction Heating Installations*. Slukhotskii A.E. ed. Leningrad: Energoizdat, 1981, 328 p. (In Russ.).
22. Smirnov M.A., Schastlivtsev V.M., Zhuravlev L.G. *Fundamentals of Steel Heat Treatment*. Moscow: Nauka i tekhnologii, 2002, 519 p. (In Russ.).

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Владимир Александрович Кузнецов**, к.т.н., доцент кафедры электротехники, электропривода и промышленной электроники, Сибирский государственный индустриальный университет  
**ORCID:** 0000-0003-0342-8750  
**E-mail:** vladimir.kuznezoff@yandex.ru

**Елена Степановна Кузнецова**, к.т.н., доцент кафедры электротехники, электропривода и промышленной электроники, Сибирский государственный индустриальный университет  
**ORCID:** 0000-0001-9427-4667  
**E-mail:** kuzlena00@yandex.ru

**Виктор Евгеньевич Громов**, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет  
**ORCID:** 0000-0002-5147-5343  
**E-mail:** gromov@physics.sibsiu.ru

**Vladimir A. Kuznetsov**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Electrical Engineering, Electric Power and Industrial Electronics, Siberian State Industrial University  
**ORCID:** 0000-0003-0342-8750  
**E-mail:** vladimir.kuznezoff@yandex.ru

**Elena S. Kuznetsova**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Electrical Engineering, Electric Power and Industrial Electronics, Siberian State Industrial University  
**ORCID:** 0000-0001-9427-4667  
**E-mail:** kuzlena00@yandex.ru

**Viktor E. Gromov**, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University  
**ORCID:** 0000-0002-5147-5343  
**E-mail:** gromov@physics.sibsiu.ru

**ВКЛАД АВТОРОВ:**

**Кузнецов В.А.** – формирование концепции обзора. Разработка имитационной модели объекта регулирования температуры металлической заготовки. Синтез модели блока, реализующего изменение температуры заготовки. Редактирование финальной версии обзора.

**Кузнецова Е.С.** – разработка имитационной модели объекта регулирования температуры металлической заготовки. Редактирование финальной версии обзора.

**Громов В.Е.** – проведение анализа источников информации по теме практического использования эффектов пластификации металлов и сплавов в современных процессах формоизменения. Редактирование финальной версии обзора.

Поступила в редакцию 27.07.2020

Received 27.07.2020

После доработки 29.09.2020

Revised 29.09.2020

Принята к публикации 20.01.2021

Accepted 20.01.2021