

УДК 621.365.3, 621.316.06

doi: 10.18698/0536-1044-2020-7-69-75

## Установка для электротермического воздействия на заготовку

С.Б. Марьин, А.Ю. Гетопанов, В.А. Пхьо, В.В. Григорьев

Комсомольский-на-Амуре государственный университет

## An Installation for Electrothermal Effects on a Workpiece

S.B. Mariin, A.Y. Getopanov, W.A. Phyo, V.V. Grigoriev

Komsomolsk-na-Amure State University

Модернизирована установка для воздействия импульсов электрического тока на заготовку, обеспечивающая производство высококачественных деталей из титановых сплавов. Исследованы электрические процессы, происходящие при использовании нового способа коммутации активно-индуктивной нагрузки с помощью трехфазного бесконтактного тиристорного пускателя. Применение такого устройства позволяет исключить длительные переходные процессы при коммутации, улучшить контроль параметров нагрева заготовки и обеспечить пластификацию металла за малые промежутки времени. К достоинствам трехфазного бесконтактного тиристорного пускателя также относятся ликвидация дефектов структуры материала, повышение термодинамической стабильности металлов, конструкционной прочности и выносливости, уменьшение анизотропии металлов и уровня остаточных напряжений.

**Ключевые слова:** трехфазная установка, электротермическое воздействие, титановые сплавы, тиристорный ключ

This paper presents a modernized installation for impacting a workpiece with electric current pulses whereby ensuring high quality of parts manufactured from titanium alloys. Electrical processes that occur when using a new method of switching an active-inductive load using a three-phase contactless thyristor starter are examined. The use of such a device can eliminate long transient processes during switching, improve control of the heating parameters of the workpiece and provide plasticization of the metal in short periods of time. Other positive effects of the three-phase contactless thyristor starter include the elimination of defects in the structure of the material, increase in the thermodynamic stability of the metals as well as in the structural strength and endurance, reduction of the anisotropy of the metals and the level of residual stress.

**Keywords:** three-phase installation, electrothermal effect, titanium alloys, thyristor key

Авиационная промышленность является основным потребителем титановых сплавов. С повышением требований к эффективности, экономичности и надежности самолетов в их конструкциях стали широко применять титановые сплавы, обладающие рядом преимуществ перед другими конструкционными материалами. К наиболее важным из этих преимуществ относятся малая масса, высокая удельная проч-

ность, жаропрочность, сопротивление усталостным нагрузкам, трещиностойкость и коррозионная стойкость [1–3].

В связи с этим становятся важными разработка и освоение новых эффективных технологических процессов деформирования металла, позволяющих изготавливать детали из труднодеформируемых сплавов с минимальным объемом их доработки. Указанным требованиям во

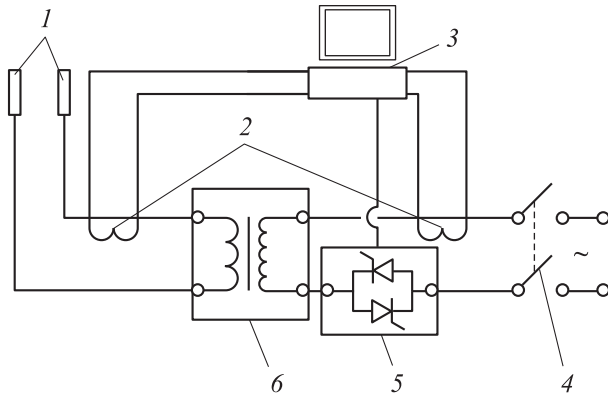


Рис. 1. Структурная схема промышленной установки для электротермической обработки заготовки:

1 — контактные аппараты; 2 — датчики тока;  
3 — процессор; 4 — выключатель сети; 5 — тиристорный пускатель; 6 — однофазный понижающий трансформатор

многим отвечают процессы штамповки [4, 5] с применением электроконтактного нагрева заготовки, обладающие технологической гибкостью и управляемостью, легко механизированные и автоматизируемые. Оборудование для их выполнения является универсальным, мобильным, недорогим и недефицитным.

Электроконтактный нагрев заготовки осуществляется двумя способами: применением электрического тока промышленной частоты для интенсификации формообразующих операций путем нагрева электросопротивлением заготовки и подачи мощных импульсов тока в заготовку, что существенно повышает показате-

тели пластичности металла и полученные после штамповки эксплуатационные показатели деталей [6, 7].

В настоящее время существует большое количество устройств электротермического воздействия на заготовку, однако многие из них не обеспечивают необходимые режимы подачи тока [8–14].

Промышленная установка для электротермической обработки заготовки, структурная схема которой приведена на рис. 1, содержит однофазный понижающий трансформатор (ТОЭСЗ 250/40) 6, тиристорный пускатель 5, выключатель сети 4, процессор 3, связанный с датчиками тока 2 в контурах высокой и низкой сторон понижающего трансформатора, управляющий тиристорным пускателем в заданных режимах.

Описанная промышленная установка позволяет пропускать мощные токи ( $I = 20\,000 \dots 30\,000$  А) через заготовку в короткое время ( $t \leq 0,3$  с), обеспечивая напряжение  $U = 10 \dots 80$  В и мощность  $W \leq 500$  кВт. В установке применен серийно выпускаемый тиристорный пускатель с простейшим устройством блока включения тириستоров [15].

По функциональным возможностям и динамическим свойствам тиристорный пускатель не отличается от электрического коммутационного аппарата, что указывает на необходимость его совершенствования. Кроме того, однофаз-

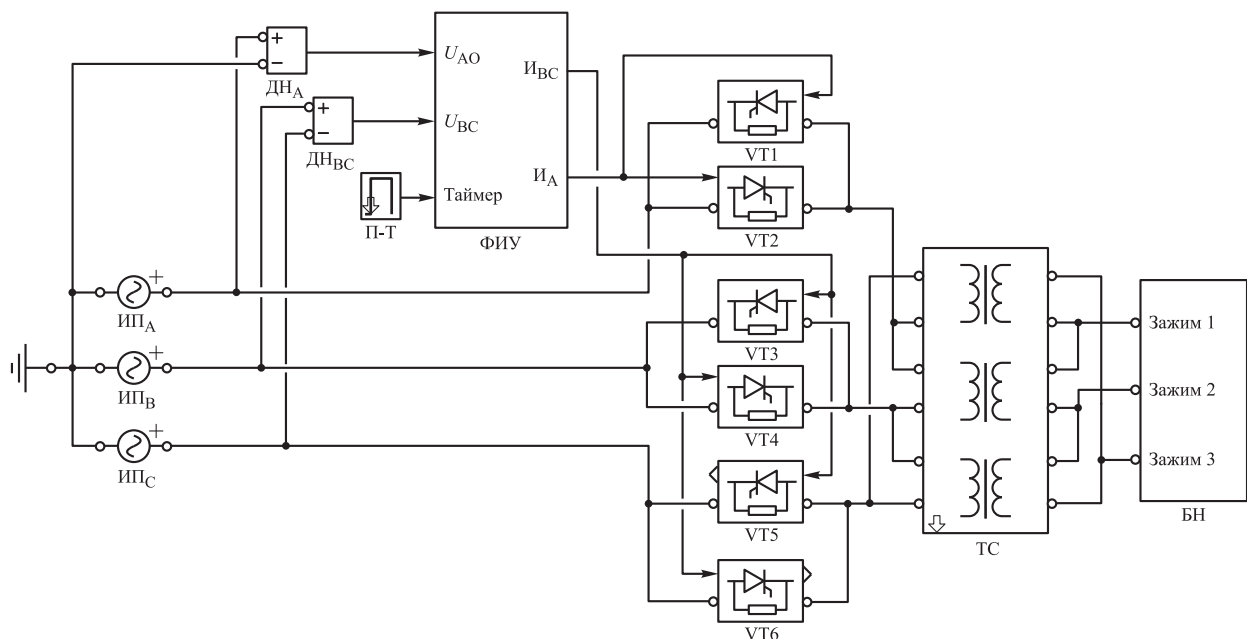


Рис. 2. Блочная-модульная схема трехфазной установки для электротермического воздействия на заготовку в среде MATLAB

ная установка такой мощности создает большую асимметрию в питающей сети, вызывая просадки напряжения.

Цель работы — модернизировать описанную установку, чтобы оптимизировать режимы энергетического воздействия на заготовку и снизить негативное влияние на промышленную сеть.

Для достижения цели предлагается задействовать трехфазную систему электропитания и применить новый способ коммутации трехфазного трансформатора.

Разработана имитационная модель трехфазной установки для электротермического воздействия на заготовку в программной среде MATLAB, блочно-модульная схема которой, приведена на рис. 2.

Обмотки модуля трехфазного силового трансформатора (ТС) со стороны высокого напряжения подключены к источнику трехфазного питания (ИП<sub>А</sub>, ИП<sub>В</sub>, ИП<sub>С</sub>), линейным напряжением  $U_{л} = 380$  В и частотой  $f = 50$  Гц посредством трехфазного тиристорного контактора, состоящего из шести тиристоров (VT1...VT6), включенных пофазно, попарно и встречно-параллельно.

Управляющие электроды тиристоров подключены к формирователю импульсов управ-

ления (ФИУ), который синхронизирует импульсы управления с сетью с помощью датчиков напряжения (ДН<sub>А</sub> и ДН<sub>ВС</sub>). Длительность импульсов управления задается модулем пуска-таймер (П-Т). Обмотки низкого напряжения ТС присоединены к зажимам блока трехфазной активной нагрузки (БН), имитирующей заготовку из титановых сплавов.

Численные эксперименты на модели, проведенные без использования синхронизации с сетью, реализуют одновременную подачу импульсов управления на тиристоры в случайный момент времени. На рис. 3, а приведены осциллограммы фазных напряжений сети  $U_{A0}$ ,  $U_{B0}$ ,  $U_{C0}$  и импульса управления всеми тиристорами  $I_T$  в увеличенном масштабе, а на рис. 3, б осциллограммы токов  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  в контурах БН.

Из рис. 3, б следует, что токи в нагрузке не вышли в установившийся режим в период времени  $\tau$ , когда тиристорный пускатель включен. Это обусловлено переходными процессами, происходящими при коммутации нагрузки, содержащей индуктивную составляющую, которой является силовой трансформатор.

Причем взаимная конфигурация и действующие значения токов трех фаз, протекающих

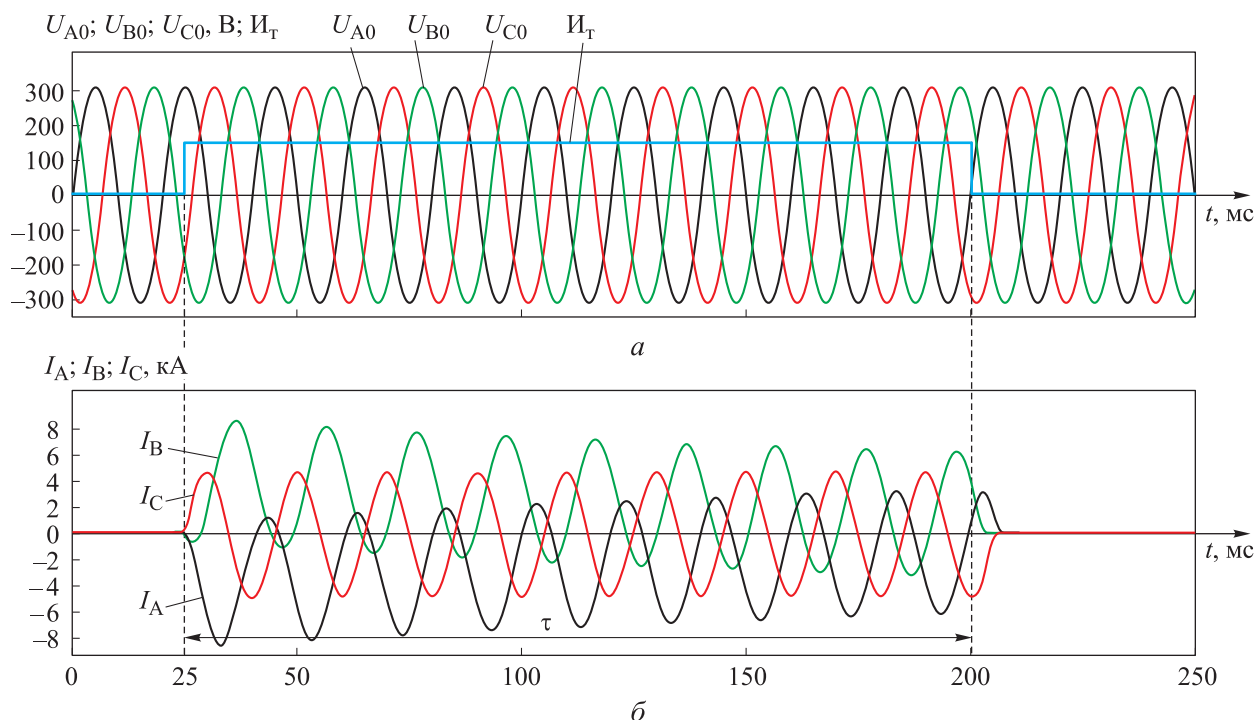


Рис. 3. Осциллограммы напряжений и токов при одновременном включении всех тиристоров:  
 а — фазные напряжения сети  $U_{A0}$ ,  $U_{B0}$ ,  $U_{C0}$  и импульс управления всеми тиристорами  $I_T$  в увеличенном масштабе;  
 б — осциллограммы токов  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  в контурах БН

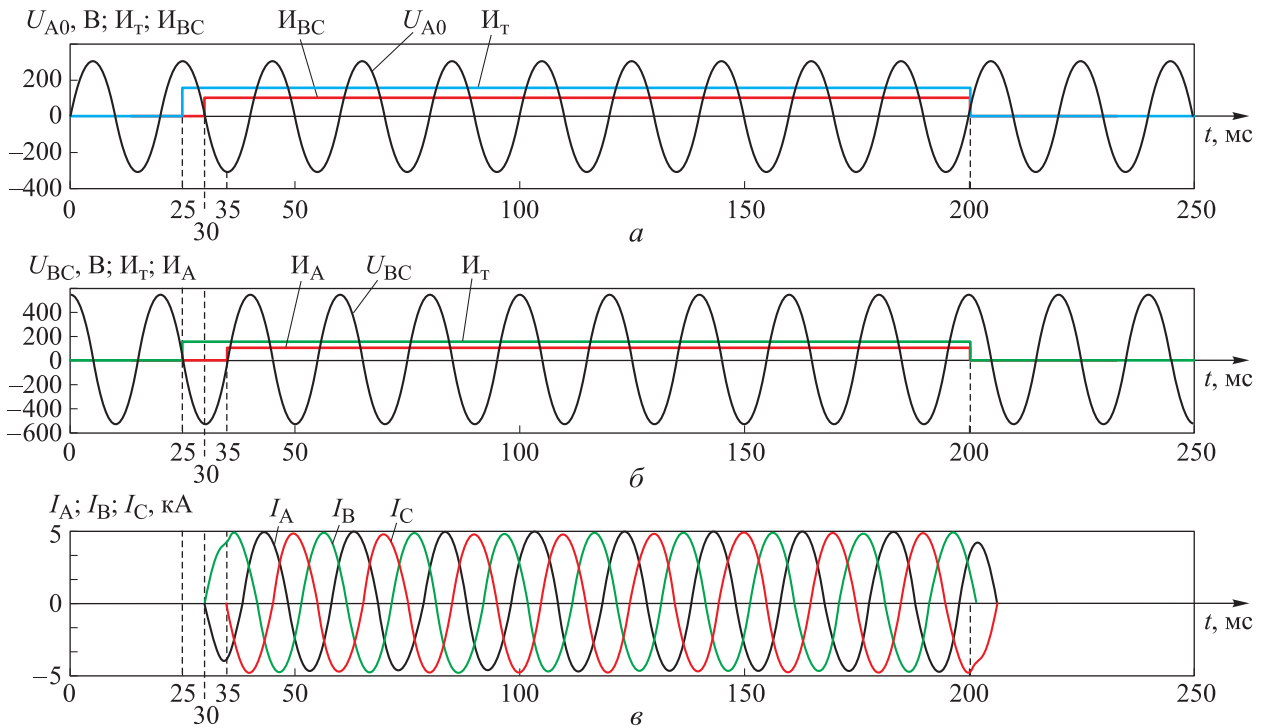


Рис. 4. Осциллограммы напряжений, токов и управляющие сигналы в увеличенном масштабе: а — фазное напряжение фазы А  $U_{A0}$ , сигнал модулю ФИУ на включение  $I_T$ , импульс управления тиристорами фаз В и С  $I_{BC}$ ; б — линейное напряжение фаз В и С  $U_{BC}$ , сигнал модулю ФИУ на включение  $I_T$ , импульс управления тиристорами фазы А  $I_A$ ; в — токи  $I_A, I_B, I_C$  в контурах БН

в контурах заготовки, могут изменяться и зависят от фазового состояния напряжения сети в момент включения тиристорного пускателя. Таким образом, контролировать уровень электротермического воздействия на заготовку достаточно сложно.

Существующий способ включения трехфазной активно-индуктивной нагрузки с помощью тиристорных ключей [16] обеспечивает установившийся режим в течение одного периода сетевого напряжения и не снижает показатели качества потребляемой электроэнергии.

Включение трехфазного трансформатора осуществляется в два действия, в каждом из которых применен один и тот же способ включения однофазной  $RL$ -цепи [17]. Суть этого способа заключается в том, что самый неблагоприятный момент включения однофазной  $RL$ -цепи наблюдается в момент нулевого значения питающего напряжения, а самый благоприятный — в момент амплитудного значения этого напряжения, т. е. в момент его максимума. Этот вывод сделан из решения дифференциального уравнения первого порядка относительно тока  $i$  при включении в минимуме и максимуме питающего напряжения и нулевых начальных условиях:

$$u = U_m \sin \omega t = R_i + L \frac{di}{dt},$$

где  $U_m$  и  $\omega$  — амплитудное значение напряжения и его циклическая частота;  $R_i$  и  $L$  — эквивалентные активное сопротивление и индуктивность схемы замещения трансформатора под нагрузкой.

Сначала подключают одну однофазную  $RL$ -цепь с удвоенными параметрами  $R$  и  $L$  к линейному напряжению в момент его максимального значения, а затем — вторую однофазную  $RL$ -цепь к соответствующему фазному напряжению, также, в момент его максимума.

Предложенный способ имеет достоинства, которые демонстрирует рис. 4:

а — после подачи команды блоку ФИУ на включение  $I_T$  в момент перехода через ноль фазного напряжения одной фазы  $U_{A0}$  формируется импульс управления тиристорными ключами фаз В и С  $I_{BC}$ ;

б — в момент перехода через «ноль» линейного напряжения фаз В и С  $U_{BC}$  формируется импульс управления тиристорами фазы А  $I_A$ ;

в — фазные токи  $I_A, I_B, I_C$  вышли в установившийся режим в течение одного периода.

Естественное отключение тиристорных происходит после снятия управляющих импульсов

в момент перехода через ноль соответствующих фазных токов.

## Вывод

Применение трехфазной системы электропитания увеличит плотность тока что, в свою

очередь, уменьшит время нагрева заготовки. Три полюса подключения вместо двух дают возможность более равномерного распределения прилагаемой энергии, учитывая геометрические особенности заготовок. Равномерное потребление трехфазного тока устранит асимметрию в электрической сети.

## Литература

- [1] Братухин А.Г., Иванов Ю.Л., Марьин Б.Н. *Штамповка, сварка, пайка и термообработка титана и его сплавов в авиастроении*. Москва, Машиностроение, 1997. 600 с.
- [2] Муравьев В.И., Бахматов П.В., Долотов Б.И. *Обеспечение надежности конструкций из титановых сплавов*. Москва, Эком, 2009. 752 с.
- [3] Братухин А.Г., Марьин Б.Н., Муравьев В.И. *Современные технологии авиастроения*. Москва, Машиностроение, 1999. 286 с.
- [4] Марьин Б.Н., Серафимов М.А., Марьин С.Б., Чернышев А.В. Установка для электроимпульсной обработки заготовок. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, 2008, № 1, с. 43–44.
- [5] Иванов Ю.Л., Марьин Б.Н., Серафимов М.А., Марьин С.Б., Иванов В.Ю., Чернышев А.В. Штамповка с электротермическим воздействием. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, 2008, № 2, с. 18–24.
- [6] Марьин С.Б., Шпилев А.М., Бурков А.А., Хохлов С.А., Волков К.В., Марьин Б.Н. Технология обработки заготовок кратковременными импульсами электрического тока. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2009, № 6, с. 49–51.
- [7] Марьин С.Б. Установка и методика проведения экспериментальных исследований электроимпульсной обработки монтажных заготовок под сборку трубопроводных систем летательных аппаратов. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2001, т. 13, № 4–2, с. 420–424.
- [8] Марьин Б.Н., Макаров К.А., Кузьмин В.Ф., Марьин С.Б., Шпорт В.И., Войтов В.Н. *Способ горячего деформирования заготовок*. Пат. 2171851 РФ, 2001, бюл. № 22. 4 с.
- [9] Шпорт В.И., Муравьев В.И., Иванов Ю.Л., Марьин Б.Н., Кузьмин В.Ф., Марьин С.Б. *Способ горячей штамповки на гидропрессах*. Пат. 2167017 РФ, 2001, бюл. № 14. 3 с.
- [10] Муравьев В.И., Чернышев А.В., Меркулов В.И., Макарова Е.А., Марьин С.Б. *Устройство для испытания трубной заготовки при различных температурах*. Пат. 2187794 РФ, 2002, бюл. № 23. 5 с.
- [11] Муравьев В.И., Якимов А.В., Якимов В.И., Чернышев А.В., Марьин С.Б. *Способ термической обработки псевдотитановых сплавов*. Пат. 2241062 РФ, 2004, бюл. № 33. 6 с.
- [12] Муравьев В.И., Якимов А.В., Марьин С.Б., Чернышев А.В., Якимов В.И., Марьин Б.Н. *Способ определения температуры полиморфного превращения в двухфазных титановых сплавах*. Пат. 2248539 РФ, 2005, бюл. № 8. 6 с.
- [13] Марьин С.Б., Сысоев О.Е., Шпорт Р.В., Лиманкин В.В., Шпилева А.А., Ханов В.А. *Устройство для испытания листового металла на двухосное растяжение*. Пат. 124806 РФ, 2013, 2013, бюл. № 4. 10 с.
- [14] Климаш В.С., Табаров Б.Д., Гетопанов А.Ю. *Способ включения, выключения и регулирования напряжения трансформаторной подстанции*. Пат. 2622890 РФ, 2017, бюл. № 18. 8 с.
- [15] Чиженко И.М., ред. *Справочник по преобразовательной технике*. Киев, ТехніКа, 1978. 447 с.
- [16] Иванов Ю.Л. *Разработка и освоение процессов деформирования листовых заготовок под сборку летательных аппаратов*. Дис. ... д-ра техн. наук. Владивосток, 1999. 164 с.
- [17] Бессонов Л.А. *Теоретические основы электротехники*. Москва, Высшая школа, 1996, с. 244–245.

## References

- [1] Bratukhin A.G., Ivanov Yu.L., Mar'in B.N. *Shtampovka, svarka, payka i termoobrabotka titana i ego splavov v aviastroyenii* [Stamping, welding, soldering and heat treatment of titanium and its alloys in the aircraft industry]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1997. 600 p.
- [2] Murav'yev V.I., Bakhmatov P.V., Dolotov B.I. *Obespecheniye nadezhnosti konstruktsey iz titanovykh splavov* [Ensuring the reliability of titanium alloy structures]. Moscow, Ekom publ., 2009. 752 p.
- [3] Bratukhin A.G., Mar'in B.N., Murav'yev V.I. *Sovremennyye tekhnologii aviastroyeniya* [Modern aircraft technology]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1999. 286 p.
- [4] Mar'in B.N., Serafimov M.A., Mar'in S.B., Chernyshev A.V. Processing of Preforms. *Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure*, 2008, no. 1, pp. 43–44 (in Russ.).
- [5] Ivanov Yu.L., Mar'in B.N., Serafimov M.A., Mar'in S.B., Ivanov V.Yu., Chernyshev A.V. Stamping of Parts with Electro-Thermal Impact. *Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure*, 2008, no. 2, pp. 18–24 (in Russ.).
- [6] Mar'in S.B., Shpilev A.M., Burkov A.A., Khokhlov S.A., Volkov K.V., Mar'in B.N. Billet process technology by electric current short duration pulses. *Blanking productions in mechanical engineering*, 2009, no. 6, pp. 49–51 (in Russ.).
- [7] Mar'in S.B. Installation and method of leadthrough of experimental researches of electro impulsive treatment of assembling purveyances under assembling of pipeline systems of aircrafts. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2001, vol. 13, no. 4–2, pp. 420–424 (in Russ.).
- [8] Mar'in B.N., Makarov K.A., Kuz'min V.F., Mar'in S.B., Shport V.I., Voytov V.N. *Sposob goryachego deformirovaniya zagotovok* [Method of blank ht deformation]. Patent RF no. 2171851, 2001. 4 p.
- [9] Shport V.I., Murav'yev V.I., Ivanov Yu.L., Mar'in B.N., Kuz'min V.F., Mar'in S.B. *Sposob goryachey shtampovki na gidropressakh* [Method for hot forming in hydraulic presses]. Patent RF no. 2167017, 2001. 3 p.
- [10] Murav'yev V.I., Chernyshev A.V., Merkulov V.I., Makarova E.A., Mar'in S.B. *Ustroystvo dlya ispytaniya trubnoy zagotovki pri razlichnykh temperaturakh* [Gear to test pipe billet at various temperatures]. Patent RF no. 2187794, 2002. 5 p.
- [11] Murav'yev V.I., Yakimov A.V., Yakimov V.I., Chernyshev A.V., Mar'in S.B. *Sposob termicheskoy obrabotki pseudo -titanovykh splavov* [Method for handling of pseudo alpha-titanium-based alloys]. Patent RF no. 2241062, 2004. 6 p.
- [12] Murav'yev V.I., Yakimov A.V., Mar'in S.B., Chernyshev A.V., Yakimov V.I., Mar'in B.N. *Sposob opredeleniya temperatury polimorfnoy prevrashcheniya v dvukhfaznykh titanovykh splavakh* [Method of measuring temperature of polymorph transformation in two-phased titanium alloys]. Patent RF no. 2248539, 2005. 6 p.
- [13] Mar'in S.B., Sysoyev O.E., Shport R.V., Limankin V.V., Shpileva A.A., Khanov V.A. *Ustroystvo dlya ispytaniya listovogo metalla na dvukhosnoye rastyazheniye* [Device for testing sheet metal for biaxial tension]. Patent RF no. 124806, 2013. 10 p.
- [14] Klimash V.S., Tabarov B.D., Getopanov A.Yu. *Sposob vklyucheniya, vyklyucheniya i regulirovaniya napryazheniya transformatornoy podstantsii* [Method for switshing-on, switshing-off and regulating voltage of transformer substation]. Patent RF no. 2622890, 2007. 8 p.
- [15] *Spravochnik po preobrazovatel'noy tekhnike* [Converter Technique Handbook]. Ed. Chizhenko I.M. Kiev, TexniKa publ., 1978. 447 p.
- [16] Ivanov Yu.L. *Razrabotka i osvoyeniye protsessov deforirovaniya listovykh zagotovok pod sborku letatel'nykh apparatov*. Dokt. Diss. [Development and mastering of processes for deforming sheet blanks for assembly of aircraft. Doct. Diss.]. Vladivostok, 1999. 164 p.
- [17] Bessonov L.A. *Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 1996, pp. 244–245.

Статья поступила в редакцию 16.06.2020



## Информация об авторах

**МАРЬИН Сергей Борисович** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Авиастроение». Комсомольский-на-Амуре государственный университет (681013, Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 27, e-mail: maryinsb@mail.ru).

**ГЕТОПАНОВ Алексей Юрьевич** — аспирант кафедры «Авиастроение». Комсомольский-на-Амуре государственный университет (681013, Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 27, e-mail: getopanov@mail.ru).

**ПХЬО Вей Аунг** — аспирант кафедры «Авиастроение». Комсомольский-на-Амуре государственный университет (681013, Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 27, e-mail: pwaung51@gmail.com).

**ГРИГОРЬЕВ Владимир Владимирович** — заведующий лабораториями факультета машиностроительных и химических технологий. Комсомольский-на-Амуре государственный университет (681013, Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 27, e-mail: grigorev.vlv@gmail.com).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Марьин С.Б., Гетопанов А.Ю., Пхью В.А., Григорьев В.В. Установка для электротермического воздействия на заготовку. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 7, с. 69–75, doi: 10.18698/0536-1044-2020-7-69-75

### Please cite this article in English as:

Mariin S.B., Getopanov A.Y., Phyo W.A., Grigoriev V.V. An Installation for Electrothermal Effects on a Workpiece. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 7, pp. 69–75, doi: 10.18698/0536-1044-2020-7-69-75

## Information about the authors

**MARIIN Sergei Borisovich** — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Department, Aircraft Engineering. Komsomolsk-na-Amure State University (681013, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation, Lenin St., Bldg. 27, e-mail: maryinsb@mail.ru).

**GETOPANOV Aleksei Yurievich** — Postgraduate, Department of Aircraft Engineering. Komsomolsk-na-Amure State University (681013, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation, Lenin St., Bldg. 27, e-mail: getopanov@mail.ru).

**PHYO Wei Aung** — Postgraduate, Department of Aircraft Engineering. Komsomolsk-na-Amure State University (681013, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation, Lenin St., Bldg. 27, e-mail: pwaung51@gmail.com).

**GRIGORIEV Vladimir Vladimirovich** — Head of Laboratories, Department of Mechanical and Chemical Technologies. Komsomolsk-na-Amure State University (681013, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation, Lenin St., Bldg. 27, e-mail: grigorev.vlv@gmail.com).



**В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышло в свет учебное пособие**

**«Тактическая подготовка»**

**Авторы: В.А. Власов, А.П. Дудь, И.В. Иванюк,  
В.В. Истомин, В.А. Кузнецов, Е.А. Шекунов**

Изложены основы тактической подготовки общевоинских подразделений и их всестороннего обеспечения, вопросы военной топографии.

Для студентов, обучающихся по программам подготовки офицеров запаса и кадра.

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru