



Научная статья  
УДК 631.171:004.3:681.587.78  
EDN: XAWJFS  
DOI: 10.21285/1814-3520-2022-3-472-481

МАШИНОСТРОЕНИЕ

## Технологический процесс исследования маслonaполнения деталей из полиамидных материалов

В.С. Бычковский<sup>1</sup>✉<sup>1</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

**Резюме.** Цель работы – разработка технологии, обеспечивающей повышение эксплуатационных свойств поверхностного слоя готовых полиамидных деталей с целью увеличения износостойкости без изменений их нагрузочной способности. Для изучения процесса пропитки образца из полиамида-6 смесью моторного масла и гексана использовались натурные экспериментальные методы исследования по разработанному алгоритму на лабораторной установке. В работе применялся программный код для управляющей платы, работающий совместно с программным комплексом PowerGraph, необходимым для обработки полученных данных. В ходе проведенного исследования выбран метод сушки образцов размерами 4x50x50 мм в электрическом поле высокой частоты (до 2500 Гц), позволяющий равномерно за короткое время нагреть и удалить влагу из полимера. Использован закон Дарси, описывающий процесс пропитки полиамида маслом. С целью повышения эффективности пропитки, понижения вязкости наполнителя определен его состав: смесь моторного масла М-8В и гексана в пропорциях от 8:2 до 4:6, соответственно. Разработана и автоматизирована установка на основе оборудования УЗП-2500 с внедрением в нее управляющей платы и датчиков для замеров показаний о силе анодного тока и температуры полиамидного образца. Также в установку встроено регулирующее устройство мощностью высокочастотного генератора, работающего в диапазоне тока 0,25...0,35 А. При использовании режимов обработки (температура полиамидного образца – 75°C, содержание гексана в смеси – 40%) определен метод контроля температуры сушки путем отключения высокочастотного генератора на 700 мс. Проведенные исследования позволяют разработать новый технологический процесс маслonaполнения полиамидных деталей, работающих в узлах трения, на заданную глубину при известных значениях скорости пропитки. Полученные результаты направлены на повышение износостойкости поверхностного слоя готовых полиамидных деталей, применяемых в тележках железнодорожных вагонов, испытывающих на себе трение и износ, с целью увеличения ресурса их работы.

**Ключевые слова:** маслonaполнение полимеров и композитов, автоматизированная система, алгоритм проведения исследования, ВЧ-сушка полимеров, режимы обработки

**Для цитирования:** Бычковский В.С. Технологический процесс исследования маслonaполнения деталей из полиамидных материалов // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 3. С. 472-481. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-472-481>. EDN: XAWJFS.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

## Technological study of oil-filled polyamide parts

Vladimir S. Bychkovskiy<sup>1</sup>✉<sup>1</sup>Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

**Abstract.** The work develops a technology that provides an increase in the operational properties of the surface layer of finished polyamide parts in order to increase wear resistance without affecting their load-bearing capacity. To study the impregnation of a polyamide-6 sample with a mixture of motor oil and hexane, full-scale experimental research was carried out following the algorithm developed using a laboratory unit. In the work, the program code for the control board was used that operates in conjunction with the PowerGraph software for processing the acquired data. During the study, a method for drying samples with the dimensions of 4x50x50 mm in a high-frequency electric field (up to 2500 Hz) was selected in order to heat and remove moisture from the polymer evenly within a short period. Darcy's law describing the process of impregnating polyamide with oil was used. In order to increase the efficiency of impregnation and reduce the

viscosity of the filler, its optimal composition was determined: a mixture of M-8B engine oil and hexane at a ratio from 8:2 to 4:6, respectively. A setup based on the UZP-2500 device was developed and automated by introducing a control board and sensors to measure the strength of the anode current and temperature of a polyamide sample. In addition, a regulating device with the power of a high-frequency generator operating in the current range of 0.25–0.35 A was built into the unit. Under the processing modes (the temperature of the polyamide sample is 75°C; the hexane content in the mixture is 40%), a method for controlling the drying temperature was established by switching off the high-frequency generator for 700 ms. The research results allow a new technological process of oil filling in polyamide parts operated in friction units to a given depth at known values of the impregnation rate to be developed. These results can help to increase the wear resistance and, consequently, the service life of the surface layer of finished polyamide parts used in railway wagon trucks exposed to friction and wear.

**Keywords:** oil filling of polymers and composites, automated system, research algorithm, high frequency drying of polymers, processing modes

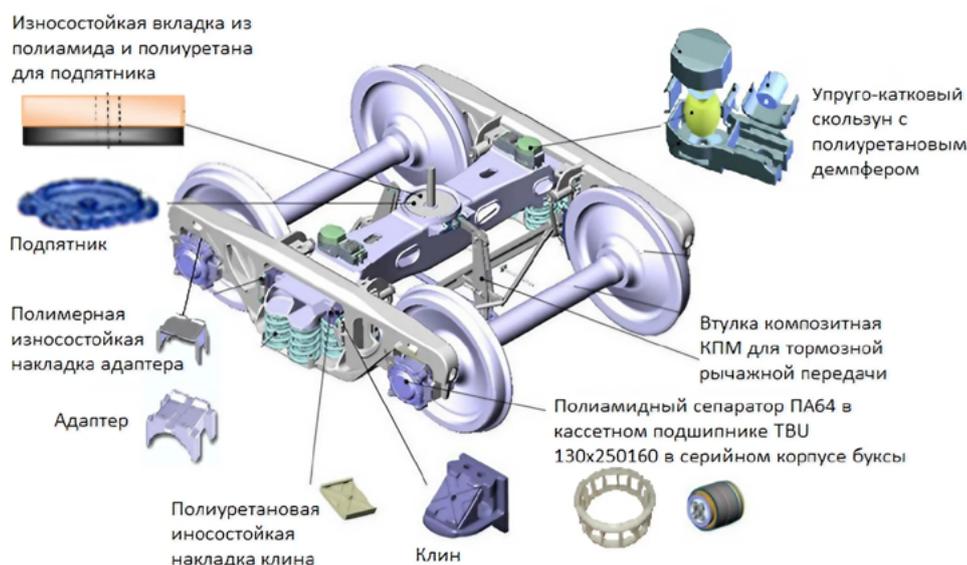
**For citation:** Bychkovskiy V.S. Technological study of oil-filled polyamide parts. *iPolytech Journal*. 2023;27(3):472-481. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-472-481>. EDN: XAWJFS.

## ВВЕДЕНИЕ

В отрасли железнодорожного транспорта, а именно – в конструкции тележек пассажирского или грузового вагона, присутствует большое количество деталей, работающих в сложных условиях, испытывающих на себе недопустимый износ под большими нагрузками в открытых узлах трения, куда попадают пыль и грязь, с отсутствием жидкостной и какой-либо смазки. Примером таких деталей могут быть прокладки, вкладыши, втулки, накладки (рис. 1). Данные узлы работают в основном в паре с ответной металлической деталью и деталью из износостойкого цветного металла (бронза или латунь), но в связи с тем, что цветные металлы не полностью удовлетворяют требованиям по износу, существует тенденция замены деталей из цветных металлов на детали из полимерных и композиционных материалов, чаще всего композитов на основе полиамида [1].

Такие полимерные детали применяются

в основном обработанном состоянии по существующим процессам модификации полимеров и композитов, которые производятся только при изготовлении самого материала детали путем добавления таких элементов, как графит, масло, стекло и углеволокно. Данные методы меняют эксплуатационные свойства всей детали, например, добавление элементов, снижающих износ, повышает пластичность, а их присоединение для повышения износостойкости и нагрузочной способности осложняет механическую обработку при добавлении стекла и углеволокна или же при добавлении стекла значительно изнашивает ответную деталь, трущуюся об полиамидную деталь в условиях большой нагрузки [2]. Исходя из этого, возникает необходимость в разработке технологии, при которой можно повышать эксплуатационные характеристики поверхностного слоя уже готовых или эксплуатируемых деталей, не меняя свойства всей детали. В связи с этим и основываясь на явле-



**Рис. 1. Полимерные и композитные детали тележки вагона 18-578 железнодорожного транспорта**

**Fig. 1. Polymer and composite parts of the 18-578 railway car truck**

нии гигроскопичности полимеров (поглощения до 10% влаги полиамид-6), имеется возможность заместить влагу маслом в детали из полиамида. Для разработки технологического процесса маслonaполнения полиамидных деталей необходимо исследовать сам процесс маслonaполнения. С этой целью разработан технологический процесс исследования маслonaполнения полиамидных деталей.

## ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработка технологического процесса исследования маслonaполнения деталей из полиамидных материалов.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач: определить способ сушки; обосновать возможность разработки технологического процесса, исходя из законов, действующих при пропитке маслом полимера; определить состав наполнителя; выявить этапы проведения исследования процесса маслonaполнения; описать алгоритм выполнения технологического процесса исследования маслonaполнения.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцом для исследуемого объекта размерами 4x50x50 мм взят полимер ПА6, наполняемый смесью, в состав которой входит моторное масло М8-В и гексан. Само определение наполненного состояния полимерного образца выполняется по представленным ранее апробированным работам [3–6] – температурно-динамическим способом определения наполненного состояния за счет расположения по определенной схеме термодатчиков в теле образца. Сущность данного метода заключается в определении, когда изменится закономерность остывания образца при прохождении наполнителя до определенной высоты расположения термодатчиков 11.1...11.5 в теле полимерного образца (рис. 2).

Разработка технологического процесса исследования маслonaполнения направлена на обеспечение параметров технологического процесса: стабильности, производительности и качества готовой продукции. Решение данных задач осуществляется за счет определения влияния режимов технологического процесса, температуры образца и пропорции

смеси на время и скорость пропитки полиамидной детали, выявление наиболее эффективной комбинации этих режимов, где скорость пропитки будет максимальной.

Так как полиамидные детали при различных условиях хранения и эксплуатации поглощают в себя влагу перед осуществлением самого процесса маслonaполнения, необходимо выгнать ее из полимера, то есть произвести их сушку [7–9]. Для решения этой задачи был проведен литературный обзор, благодаря которому найдена технология высокой частоты ВЧ-сушки деталей из полиамидного материала [10–12]. Исследуемый объект помещается между двумя плитами (рис. 2), имитируемыми конденсатор, после подается напряжение высокой частоты от электронного генератора на радиолампах. Переменное высокочастотное электрическое поле между плитами вызывает разогрев диэлектрического материала образца [13–15]. В данных работах авторы производили процесс обработки токами высокой частоты на доработанном промышленном оборудовании УЗП-2500 с целью восстановления эксплуатационных свойств полиамидных деталей после разносезонных условий эксплуатации. В целях обеспечения управления технологическим процессом ВЧ-сушки рассмотрена работа, в которой исследовалась зависимость анодного тока от фазового состояния полиамида, благодаря чему был предложен способ определения сухого состояния и температуры плавления полимера по изменению анодного тока по времени, исходя из его точек экстремума, первая точка максимума соответствует сухому состоянию полиамида [16]. Проведенное исследование позволило определиться с тем, что анодный ток будет режимом технологического процесса маслonaполнения для операции сушки. Разработанная технология ВЧ-сушки применима для разработки технологии маслonaполнения с целью выгнать влагу, помимо прочего, восстановить эксплуатационные свойства к исходным до эксплуатации или до хранения.

Для разработки технологии исследования процесса маслonaполнения необходимо понять, какие закономерности применимы к данному физическому явлению. Так как детали из полиамидных материалов являются

<sup>2</sup>ТУ2224-036-00203803-2012. Капрон (полиамид 6-блочный). Технические условия. Введ. 01.01.2013. ОАО «Метафракс».

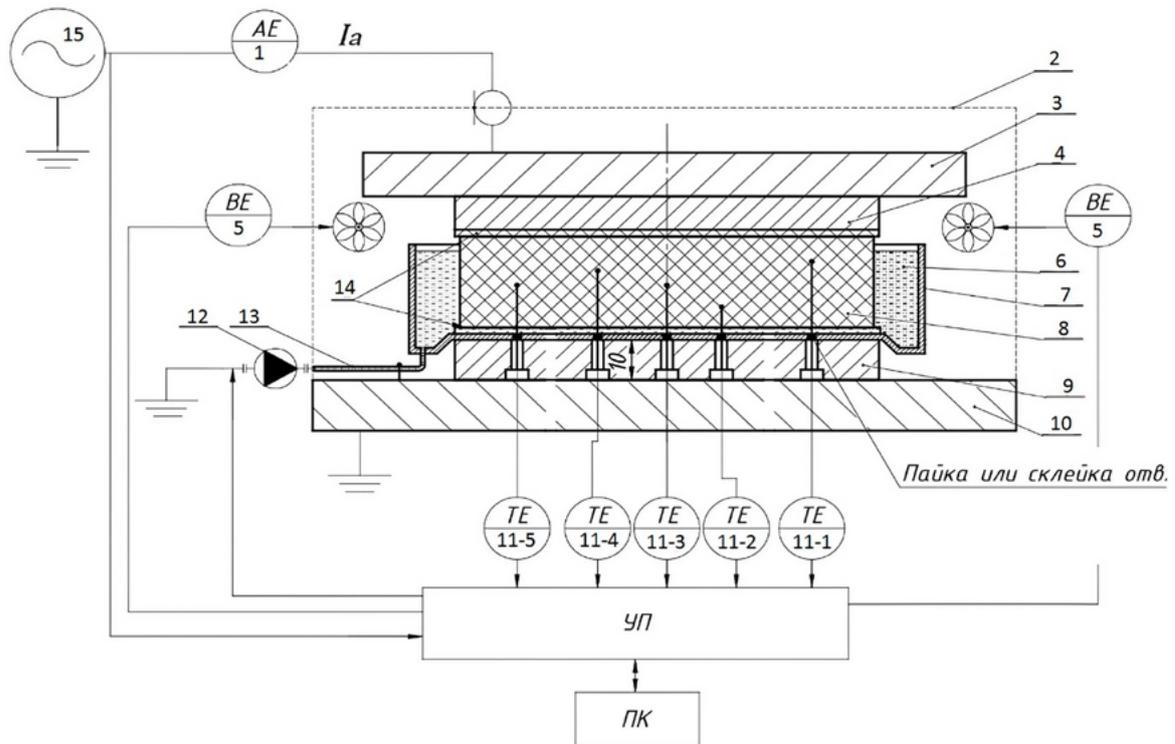
гидрофильными [17] и пористыми, согласно ТУ2224-036-00203803-2012<sup>2</sup>, размер пор может быть в пределах от 0,1 до 1,5 мм. Размеры исследуемого полиамидного образца имеют геометрическую форму пластины (4x50x50 мм), течение наполнителя можно представить однонаправленным (линейная фильтрация) снизу вверх (рис. 2), течением через граничные боковые области в связи с малой высотой образца можно пренебречь. Данный физический процесс маслонаполнения можно отнести к капиллярному явлению с использованием закона фильтрации в пористых средах, описываемый уравнением неразрывности и законом Дарси (1):

$$Q = \frac{kA \Delta P}{\mu L}, \quad (1)$$

где  $Q$  – объемный расход наполнителя, см<sup>3</sup>/с;  $A$  – площадь фильтрации, см<sup>2</sup>;  $k$  – коэффициент проницаемости, Д;  $\mu$  – динамическая вязкость наполнителя, Па·с;  $\Delta P$  – перепад давления, Па, на образце длиной  $L$ , см. Данное предположение обосновывает возможность в разработке настоящего технологического процесса.

Для того чтобы определиться с видом наполнителя и повысить эффективность пропитки, необходимо понижение вязкости наполнителя (масла). Исходя из этого, была рассмотрена работа авторов [18–20], заключающаяся в термовакуумном нагреве, а после – наполнении полиамидных образцов моторным маслом М8-В с добавлением в него гексана, приблизительные пропорции – 70% масла и 30% гексана. Что позволило достичь вязкости наполнителя близкой к вязкости воды в целях достижения максимального объема впитывания полимером жидкости, близкого к 10%. Результаты работы взяты за основу для определения состава масляного наполнителя для настоящего исследования. Исходя из этого, определены технологические режимы операции маслонаполнения, это температура полиамидного образца и процентное содержание гексана в масле.

Для решения задач настоящего исследования, с учетом уже разработанной и рассчитанной схемы расположения термопар в теле полимерного образца для контроля температуры по всему объему, необходимой для опреде-



**Рис. 2.** Схема экспериментально-исследовательской установки (1 – амперметр; 2 – защитный экран; 3 – высокопотенциальный электрод; 4 – высокопотенциальная плита; 5 – вентилятор; 6 – масло; 7 – ванна; 8 – обрабатываемое изделие [9–11]; 9 – низкопотенциальная опорная плита; 10 – заземленный электрод; 11 – термодатчик 11–1...11–5 для контроля температуры по всему объему и уровня заполнения маслом образца; 12 – насос; 13 – трубка для подвода и отвода наполнителя (масла); 14 – картонный изолятор; 15 – генератор высокой частоты)

**Fig. 2.** Diagram of the experimental research installation (1 – ammeter; 2 – protective screen; 3 – high-potential electrode; 4 – high-potential plate; 5 – fan; 6 – oil; 7 – tank; 8 – processed product [9–11]; 9 – low-potential base plate; 10 – earthed electrode; 11 – sensor 11–1...11–5 for temperature control over the entire volume and oil filling level of the sample; 12 – pump; 13 – tube for filler (oil) supply and removal; 14 – cardboard insulator; 15 – high frequency generator)

ления скорости пропитки, разработана схема автоматизированной экспериментально-исследовательской установки электротермического маслonaполнения, представленная на рис. 2.

Технологический процесс исследования маслonaполнения состоит из следующих этапов:

- изготовление образца размерами 4x50x50 мм с заранее просверленными отверстиями в нем по схеме [3], необходимыми для размещения в них термодатчиков;
- выполнение изоляторов из картона размерами 0,5x55x55 мм;
- расположение образца на ванне-электроде (рис. 3) с установкой сверху и снизу изоляторов;
- установка собранной ванны с образцом

- подача наполнителя;
- контроль достижения пропитки, наблюдение за временем процесса и показаниями на термодатчиках, результаты регистрируются в PowerGraph;

- завершение процесса, изъятие исследуемого образца;
- обработка результатов исследования;
- повтор этапов исследования нового образца со следующей комбинацией режимов технологического процесса.

В ходе разработки технологического процесса исследования маслonaполнения разработана оснастка «Ванна-электрод» для установки наполнения полимерного образца.

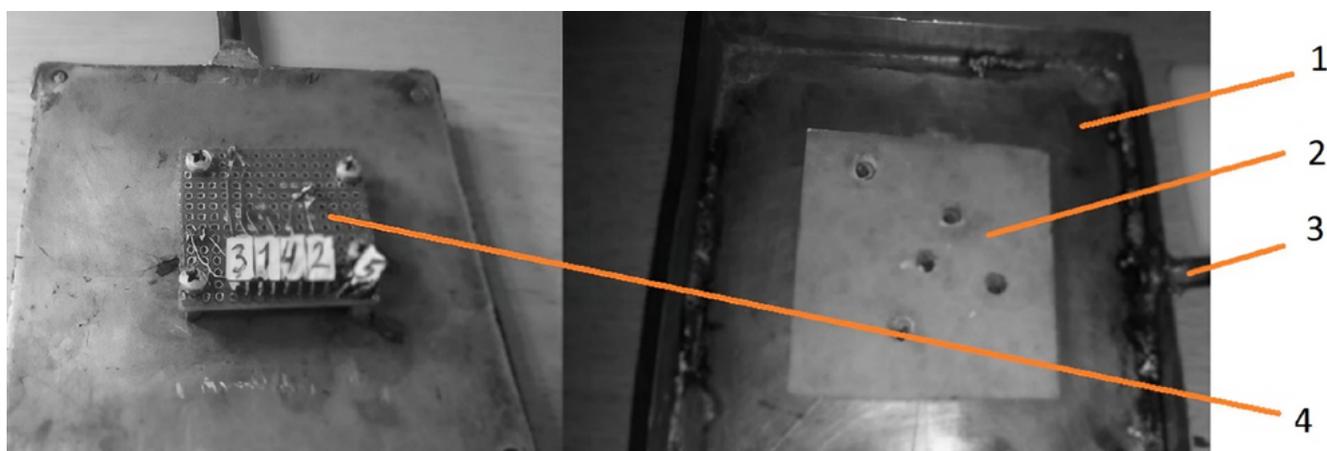


Рис. 3. Ванна-электрод со встроенными термодатчиками (1 – ванна 100x100 мм; 2 – картонный изолятор; 3 – медная трубка для подачи наполнителя; 4 – плата термисторов)

Fig. 3. Electrolytic tank with built-in temperature sensors (1 – 100x100 mm tank; 2 – cardboard insulator; 3 – copper tube for filler supply; 4 – thermistor board)

на низкопотенциальной плите ВЧ-установки УЗП2500;

- закрытие колпака и включение электромагнита для его фиксации;
- подключение блока управления к компьютеру;
- запуск программного обеспечения PowerGraph;
- повернуть до упора влево рукоятку регулировки мощности;
- подача питания на ВЧ-генератор;
- достижение сухого состояния по анодному току согласно работе авторов [3];
- охлаждение до требуемой температуры согласно пропорции гексана и масла в наполнителе. Температура полимерного образца не должна превышать предельные значения температуры испарения гексана из масла;
- отключение питания ВЧ-генератора;

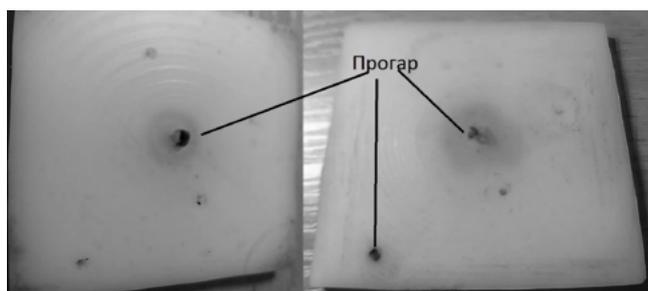


Рис. 4. Фото прогара на образце из ПА6 с размерами 4x50x50 мм

Fig. 4. An image of PA6 sample burnout with the dimensions of 4x50x50 mm

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведения экспериментальных исследований возникла проблема, а именно – проблема прогара образца в местах, где присутствовала наибольшая глубина отвер-

ствия под термодатчик в теле объекта, в виде дефекта глобального углубления (рис. 4). Причину возникновения данного явления можно пояснить резкими скачками мощности электротермического излучения. Исходя из этого, было принято решение добавить автоматическое регулирование мощности ВЧ-генератора за счет установки шагового двигателя с ременным редуктором (рис. 5). Данный механизм был совмещен с рукоятью регулировки мощности ВЧ-генератора.

Исходя из этой модернизации, возникла задача по определению интервала величины анодного тока, при нем достигается состояние полностью высушенного образца, который будет выдерживаться за счет разработанного устройства регулировки мощности.

Экспериментальным путем был определен интервал значений анодного тока, при нем достигается полная сушка и не происходит прогар образца, 0,25...0,35 А. Определенный интервал значения анодного тока соответствует приблизительно температуре 170°C, что удовлетворяет установленному ранее условию предела температуры для достижения полностью сухого состояния образца из ПА6 [12, 13].

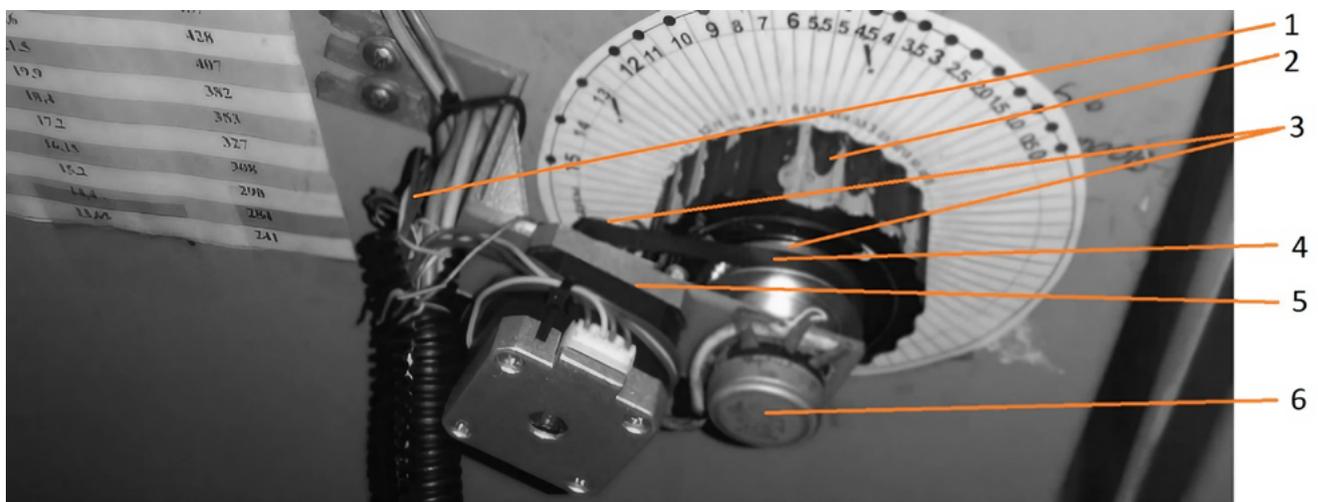
Исходя из проведенных работ по разработке технологического процесса исследования маслonaполнения деталей из полиамидных материалов, разработана автоматизированная экспериментально-исследовательская установка на основе использования оборудования УЗП 2500 путем внедрения в него блока управления с разработанной управляющей программой, в которой за основной управля-

емый параметр взята величина анодного тока [16], по нему производится управление температурой нагрева для сушки с последующим контролем наполнения по термодатчикам масляным наполнением.

По окончании работ составлен код управляющей программы для данной установки по алгоритму управления исследованием технологического процесса. Этот код загружается в управляющую плату. Все данные с управляющей платы считываются при помощи программного обеспечения PowerGraph.

Для настоящего исследования в качестве результатов проведенных работ выполнено описание алгоритма выполнения технологического процесса исследования маслonaполнения полиамидных образцов при режимах: анодный ток – 0,25...0,35 А, температура образца – 75°C, 40% гексана.

Установка запущена, начался отчет времени работы ВЧ-генератора. При помощи датчика тока ACS712 считывается величина анодного тока и сравнивается с заданным интервалом значений (0,2...0,35 А). Если значение анодного тока превышает заданный предел, то шаговый двигатель уменьшает или увеличивает мощность за счет изменения угла поворота рукоятки. По установленному датчику угла поворота WH148 узнается угол поворота рукоятки регулировки мощности ВЧ-генератора. По полученным значениям анодного тока  $I_a$  и угла поворота  $\varphi$  рассчитывается мощность высокочастотного генератора по формуле (2):



**Рис. 5. Автоматическое устройство регулировки мощности высокой частоты (1 – драйвер с переходной платой; 2 – рукоятка; 3 – шкивы; 4 – ремень; 5 – шаговый двигатель; 6 – потенциометр)**  
**Fig. 5. Automatic high frequency power control (1 – driver with an adapter board; 2 – handle; 3 – belt rollers; 4 – belt; 5 – stepper motor; 6 – potentiometer)**

$$P = I_a \times U, \quad (2)$$

где  $I_a$  – анодный ток, А;  $U$  – напряжение, В.  
По формуле (3) [8] определим

$$U = -0,04 \times \varphi^5 + 2,21 \times \varphi^4 - 41,03 \times \varphi^3 + 407,55 \times \varphi^2 - 1907,4 \times \varphi + 4000, \quad (3)$$

где  $\varphi$  – угол поворота рукоятки мощности ВЧ-генератора.

**По полученным значениям тока  $I_a$  и мощности  $P$  строятся графические данные в реальном времени в программном обеспечении PowerGraph.**

В связи с тем, что датчики температуры NTC 3950 находятся в поле высокой частоты во время работы ВЧ-генератора, на них воздействуют значительные помехи, изменяющие температуру исследуемого объекта, что не является целесообразным в данном исследовании. Для решения этой задачи было принято решение периодически выключать ВЧ-генератор. Время работы ВЧ-генератора длится в течение 5 с, после происходит отключение его за счет твердотельного реле. После отключения срабатывает счетчик на 700 мс (миллисекунд) [21], необходимый для того, чтобы высокочастотное поле успело рассеяться и не смогло оказывать никакого воздействия на показания температуры, которые снимаются с термодатчиков [4]. Затем в течение 300 мс происходит замер температуры полимерного образца и вывод графических данных в программное обеспечение PowerGraph. По окончании этих временных интервалов снова включается ВЧ-генератор.

После достижения средней температуры между датчиками  $170^\circ\text{C}$  отключается ВЧ-генератор. Включаются вентиляторы обдува при подаче сигнала на механическое реле. Вентиляторы используются для избавления поверхностной влаги на образце. Затем по первому термодатчику 11.1 контролируется температура остывания образца до  $75^\circ\text{C}$  (для масляного наполнителя с содержанием гексана 40%), так масляный наполнитель поступает снизу вверх. Для исследования важна температура, близкая к нижней поверхности исследуемого объекта. По достижении данной температуры отключаются вентиляторы, и по силиконовой трубке ванны-электрода подается масляный наполнитель.

Потом продолжается замер температур по

пяти термодатчикам, и по ним же в реальном времени рассчитывается производная температуры по времени,  $dT1/dt...dT5/dt$ .

По полученным значениям производных  $X1...X5$  высчитывается средняя величина из 50-ти замеров. Позже – итоговые данные  $X1_{ср}...X5_{ср}$ . При помощи операции сравнения средних значений определяем точку минимум на графике производной температуры по времени, что соответствует достижению наполнителя соответствующей точки. Для случая, если у какой-либо производной температуры по времени не было определено точки экстремума-минимум (туда не поступил наполнитель), установлен счетчик на 60 с, так как по проведенным многочисленным экспериментам это максимальное время для наполнения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования обеспечивают разработку новых методов и технологий повышения эксплуатационных характеристик поверхностного слоя детали, не изменяя свойства всего ее объема, позволяющие повысить ресурс эксплуатации полиамидных деталей и долговечности машин.

Технологический процесс исследования, разработанный с привлечением автоматизации промышленного оборудования УЗП-2500, необходимого для определения наиболее оптимальных режимов обработки, исходя из определения скорости наполнения, позволяет повысить его параметры, такие как производительность и стабильность обработки уже готовых деталей.

На основе проведенных экспериментов с полимерными образцами из материала ПА6 по разработанной автоматизированной системе появилась возможность составления базы данных по различным полимерным и композиционным материалам для определения пропитки наполнителем на заданную глубину, зная время и скорость проникновения. Результаты данного исследования применимы для модификации полимерных и композиционных материалов используемых в узлах трения деталей.

Результаты настоящего исследования применимы для дальнейшего изучения изменения эксплуатационных свойств полимерных и композиционных деталей, таких как износостойкость, ударная вязкость, коэффициент

трения и т.д. в целях повышения качества готовых полимерных деталей.

По завершении проведенной работы можно сделать выводы о том, что технологический процесс исследования маслonaполнения позволяет обеспечить разработку совершенно нового технологического процесса пропитки полиамидных деталей без применения термодатчиков на заданную глубину поверхностного слоя, который будет больше величины допустимого износа, исходя из определенной скорости пропитки, согласно выбранным режимам.

По окончании проведенных работ была достигнута цель настоящего исследования, а именно – разработка технологического процесса исследования маслonaполнения деталей из полиамидных материалов, позволяющая создать новый технологический процесс самого маслonaполнения, который может обеспечить повышение долговечности износостойких полимерных и композиционных деталей, работающих в сложных условиях на железнодорожном транспорте.

#### Список источников

1. Скачков А.Н., Юхневский А.А., Мешков В.В., Горлов И.В., Горлов А.И. Триботехнические испытания нового материала для вкладыша скользунa пассажирского вагона // Транспорт Российской Федерации. 2015. № 3. С. 69–71. EDN: UCCVUJ.
2. Ярославцев В.М. Технологические решения проблем обработки ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2005. № S2. С. 41–62. EDN: WDTWYT.
3. Бычковский В.С., Филиппенко Н.Г., Лившиц А.В., Баканин Д.В., Фарзалиев Э.Ф. Автоматизированный способ контроля наполнения маслом полимерных и композиционных материалов // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2021. Т. 68. № 4. С. 9–16. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2021-68-4-9-16>. EDN: NTDJOF.
4. Bychkovsky V., Bakanin D., Filippenko N., Butorin D., Kuraitis A., Larchenko A. Contact method of volume control of temperature of a polymer sample at high-frequency heating // Journal of Physics: Conference Series. Series: International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies. 2020. Vol. 1614. P. 012053. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1614/1/012053>. EDN: ILAHBS.
5. Филиппенко Н.Г., Лившиц А.В. Автоматизированные исследования процесса пропитки эластомеров // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2022. Т. 69. № 1. С. 72–78. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2022-69-1-72-78>. EDN: QDIYUJ.
6. Чернец М., Шилько С., Корниенко А., Пашечко М. Трибоанализ антифрикционных материалов на основе полиамидов для металлополимерных подшипников скольжения // Трение и износ. 2023. Т. 44. № 2. С. 103–113. <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2023-44-2-103-113>.
7. Владимирова А.А., Воробьев А.А. Установление оптимального материала для сепаратора подшипника буксового узла вагона метрополитена // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте рельсового подвижного состава: сб. тр. конф. (г. Санкт-Петербург, 30 ноября 2022 г.). 2022. С. 40–45. EDN: GGIYWR.
8. Ларченко А.Г. Автоматизированное выявление дефектов в изделиях из полиамидных материалов методом высокочастотного излучения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2014. № 1. С. 160–165.
9. Mamada S., Ohta T., Okamura Yo. Autonomous damage detection system for damaged axle bearings of railway car bogies // Quarterly Report of RTRI. 2023. Vol. 64. Iss. 3. P. 193–198. [https://doi.org/10.2219/rtriqr.64.3\\_193](https://doi.org/10.2219/rtriqr.64.3_193).
10. Лачинов А.Н., Давлетгареев Х.И., Яхин А.Р., Юсупов А.Р., Карамов Д.Д., Галиев А.Ф. Подвижность носителей заряда вдоль границы раздела полимер/полимер // Известия Уфимского научного центра РАН. 2023. № 2. С. 28–33. <https://doi.org/10.31040/2222-8349-2023-0-2-28-33>. EDN: PXPANP.
11. Буторин Д.В. Математическое моделирование процесса высокочастотной сушки партии полимерных изделий, изолированных от электродов рабочего конденсатора с обеих сторон // Colloquium-Journal. 2018. № 7-3. С. 14–23.
12. Антипов Ю.Н., Дмитренко Е.В., Коваленко А.В., Горяной С.А., Рыбаков А.А., Семенов С.Е., Филипчук Т.Н. Технология производства газонепроводных труб способом высокочастотной сварки на ПАО «Интерпайп НМТЗ» // Автоматическая сварка. 2014. № 3. С. 43–49. EDN: TDMVCH.
13. Fesharaki P.J., Boutaous M., Xin Shi He. Numerical and experimental study of polymers microwaves heating // Key Engineering Materials. 2022. Vol. 926. P. 1890–1899. <https://doi.org/10.4028/p-92u0g5>.
14. Jinesh K.J., Pankaj S. Recent trends in welding polymers and polymer–metal hybrid structures // Light Weight Materials / eds. K. Kumar, B.S. Babu, J.P. Davim. 2021. P. 39–71. <https://doi.org/10.1002/9781119887669.ch3>.
15. Sater N.A., Grigorov A., Tulska A., Nahliuk M., Lazorik P. Theoretical basis of application of the parameter of dielectric permeability of hydrocarbon feedstock during its processing // EAI International Conference on Automation and Control in Theory and Practice. EAI ARTEP 2023. EAI/Springer Innovations in Communication and Computing / eds. M. Balog, A. Iakovets, S. Hrehova. Cham: Springer, 2023. P. 139–150. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-31967-9\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-031-31967-9_11).
16. Бородаев И.А., Желтухин В.С., Сизов А.С., Сысоев В.А. Математическое моделирование обработки сверхвысокомолекулярного полиэтилена высокочастотной плазмой пониженного давления // Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий. 2019. Т. 1. № 10. С. 53–56. EDN: CMOUZX.
17. Нельсон У.Е. Технология пластмасс на основе полиамидов / пер. с англ. С.Г. Куличихина, Р.З. Маркович; под

ред. А.Я. Малкина. М.: Химия, 1979. 256 с.

18. Колесников В.И., Мясникова Н.А., Мясников Ф.В., Мантуров Д.С., Новиков Е.С., Данильченко С.А., Авиллов В.В. Трибологические и физико-механические свойства маслonaполненных композитов на основе фенолона // Трение и износ. 2018. Т. 39. № 5. С. 462–470. EDN: FRPKDH.

19. Булатова В.И., Молчанов В.И. Набухание наполненных резин в полярных средах // Материалы студенческой научной конференции за 2016 год: в 2 ч. Ч. I. Технические науки. Воронеж, 2016. С. 559.

20. Петрова П.Н., Федоров А.Л. Исследование механизмов формирования износостойких маслonaполненных композитов на основе политетрафторэтилена, полученных путем пропитки пористых заготовок // Вестник Северо-восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. 2010. Т. 7. № 4. С. 52–58.

21. Eguchi K., Ishibashi T. A high voltage generation using a hybrid Marx generator with Fibonacci operation // Energy Reports. 2023. Vol. 9. P. 256–264. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.415>.

## References

1. Skachkov A.N., Yukhnevskiy A.A., Meshkov V.V., Gorlov I.V., Gorlov A.I. Tribotechnical testing of a new material for the side bearing liner of a passenger car. *Transport Rossijskoj Federacii*. 2015;3:69-71. (In Russ.). EDN: UCCVUJ.

2. Yaroslavtsev V.M. Technological solutions to the processing issues of composite material rocket and aerospace structures. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N.E. Baumana. Seriya: Seriya Mashinostroyeniye = Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*. 2005;S2:41-62. (In Russ.). EDN: WDTWYT.

3. Bychkovskiy V.S., Filippenko N.G., Livshits A.V., Bakanin D.V., Farzaliev E.F. Automated method for controlling oil filling of polymer and composite materials. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2021;68(4):9-16. (In Russ.). <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2021-68-4-9-16>. EDN: NTDJOF.

4. Bychkovsky V., Bakanin D., Filippenko N., Butorin D., Kuraitis A., Larchenko A. Contact method of volume control of temperature of a polymer sample at high-frequency heating. *Journal of Physics: Conference Series. Series: International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies*. 2020;1614:012053. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1614/1/012053>. EDN: ILAHBS.

5. Filippenko N.G., Livshits A.V. The automated research of the impregnation process of elastometers. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2022;69(1):72-78. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2022-69-1-72-78>. EDN: QDIYUJ.

6. Chernets M., Shil'ko S., Kornienko A., Pashechko M. Triboanalysis of antifrictional materials based on polyamides for metal-polymer sliding bearings. *Trenie i iznos = Journal of Friction and Wear*. 2023;44(2):103-113 (In Russ.). <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2023-44-2-103-113>.

7. Vladimirova A.A., Vorob'ev A.A. Search for the optimal material for the bearing separator of the subway car axle box unit. In: *Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte rel'sovogo podvizhnogo sostava: sbornik trudov konferencii = Advanced technologies used in rail rolling stock repair: collected articles of the conference*. 30 November 2022, Saint-Petersburg. Saint-Petersburg; 2022, p. 40-45. (In Russ.). EDN: GGIYWR.

8. Larchenko A.G. Automatic detection of defects in the product of a polyamide materials by a method of high radiation. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie = Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2014;1:160-165. (In Russ.).

9. Mamada S., Ohta T., Okamura Yo. Autonomous damage detection system for damaged axle bearings of railway car bogies. *Quarterly Report of RTRI*. 2023;64(3):193-198. [https://doi.org/10.2219/rtrriqr.64.3\\_193](https://doi.org/10.2219/rtrriqr.64.3_193).

10. Lachinov A.N., Davletgareev H.I., Yakhin A.R., Yusupov A.R., Karamov D.D., Galiev A.F. Charge mobility along the polymer. *Izvestia Ufimskogo Nauchnogo Tsentra RAN = Proceedings of the RAS Ufa Scientific Centre*. 2023;2:28-33. (In Russ.). <https://doi.org/10.31040/2222-8349-2023-0-2-28-33>. EDN: PXPANP.

11. Butorin D.V. Mathematical modeling of high-frequency drying of polymer products insulated on both sides from the working capacitor electrodes. *Colloquium-Journal*. 2018;7-3:14-23. (In Russ.).

12. Antipov Yu.N., Dmitrenko E.V., Kovalenko A.V., Goryanov S.A., Rybakov A.A., Semenov S.E., Filipchuk T.N. High-frequency welding production technology of gas and oil pipeline pipes at PJSC Interpipe NMTZ. *Avtomaticheskaya svarka*. 2014;3:43-49. EDN: TDMVCH.

13. Fesharaki P.J., Boutaous M., Xin Shi He. Numerical and experimental study of polymers microwaves heating. *Key Engineering Materials*. 2022;926:1890-1899. <https://doi.org/10.4028/p-92u0g5>.

14. Jinesh K.J., Pankaj S. Recent trends in welding polymers and polymer-metal hybrid structures. In: Kumar K., Babu B.S., Davim J.P. (eds.). *Light Weight Materials*. 2021, p. 39-71. <https://doi.org/10.1002/9781119887669.ch3>.

15. Sater N.A., Grigorov A., Tulska A., Nahliuk M., Lazoric P. Theoretical basis of application of the parameter of dielectric permeability of hydrocarbon feedstock during its processing. In: Balog M., Iakovets A., Hrehova S. (eds.). *EAI International Conference on Automation and Control in Theory and Practice. EAI ARTEP 2023. EAI/Springer Innovations in Communication and Computing*. Cham: Springer; 2023, p. 139-150. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-31967-9\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-031-31967-9_11).

16. Borodaev I.A., Zheltuhin V.S., Sizov A.S., Sysoev V.A. Mathematical modeling of low-pressure high-frequency plasma processing of ultra-high molecular weight polyethylene. *Nizkotemperaturnaya plazma v processah naneseniya funkcional'nyh pokrytij*. 2019;1(10):53-56. EDN: CMOUZX.

17. Nelson U.E. Nylon plastics technology. 1979, 256 p. (Russ. ed.: *Tekhnologiya plastmass na osnove poliamidov*. Moscow, Himiya; 1979, 256 p.)

18. Kolesnikov V.I., Myasnikova N.A., Myasnikov P.V., Manturov D.S., Novikov E.S., Danilchenko S.A., Avilov V.V. Tribological and physicomachanical properties of oil-filled, phenilon-based composites. *Trenie i iznos = Journal of Friction*

*and Wear.* 2018;39(5):365-370. (In Russ.). EDN: FRPKDH.

19. Bulatova V.I., Molchanov V.I. Filled rubber swelling in polar environments. In: *Materials studencheskoj nauchnoj konfere ncii za 2016 god. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of the student scientific conference 2016. Engineering Sciences.* Voronezh; 2016, p. 559. (In Russ.).

20. Petrova P.N., Fedorov A.L. Researching formation mechanism of polytetrafluoroethylene-based wear-resistant oil-filled composites obtained by porous half-product impregnation. *Vestnik severo-vostochnogo federal'nogo universiteta im. M.K. Ammosova = Vestnik of North-Eastern Federal University.* 2010;7(4):52-58. (In Russ.).

21. Eguchi K., Ishibashi T. A high voltage generation using a hybrid Marx generator with Fibonacci operation. *Energy Reports.* 2023;9:256-264. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.415>.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Бычковский Владимир Сергеевич,**  
ассистент кафедры автоматизации  
производственных процессов,  
Иркутский государственный университет  
путей сообщения,  
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия  
✉ [bikovskii\\_vs@mail.ru](mailto:bikovskii_vs@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-5831-3216>

#### Вклад автора

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

#### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

#### Информация о статье

Статья поступила в редакцию 4.05.2023 г.; одобрена после рецензирования 27.06.2023 г.; принята к публикации 15.07.2023 г.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Vladimir S. Bychkovskiy,**  
Assistant Professor of the Department of Automation  
of Production Processes,  
Irkutsk State Transport University,  
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia  
✉ [bikovskii\\_vs@mail.ru](mailto:bikovskii_vs@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-5831-3216>

#### Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

#### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

#### Information about the article

The article was submitted 4.05.2023; approved after reviewing 27.06.2023; accepted for publication 15.07.2023.