

Создание автоматизированной системы магнитно-импульсной обработкой металлов на основе ключевого фактора успеха для подготовки технологов

Е. А. Громова*, И. Н. Хаймович, К. С. Летунова, Д. А. Елистратов

ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара, Российская Федерация

Адрес: 443086, Российская Федерация, г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 34

* yazykova777@gmail.com

Аннотация

В статье представлено описание организации процесса создания автоматизированной системы магнитно – импульсной обработкой металлов (МИОМ) на основе ключевых факторов успеха (КФУ). Импульсные методы обработки материалов являются новым направлением в технике, в котором используется энергия взрыва импульсного магнитного поля (ИМП), высоковольтного разряда в жидкости и ряд других импульсных источников энергии. Магнитно – импульсная обработка металлов требует тщательного соблюдения мер безопасности, серьезного подхода при проектировании основной и вспомогательной оснастки, а так же квалифицированных и компетентных технологов. Ввиду этих особенностей актуальной становится задача создания автоматизированной системы управления процессом. Автоматизированная система имеет сложный алгоритм, включающий в себя большое количество бизнес-процессов, для определения их порядка программирования необходимо сопоставить степень важности конкретного бизнес-процесса с ключевыми факторами успеха для процесса МИОМ. Можно достичь значительного конкурентного преимущества реализации стратегии при правильном определении критических факторов успеха, нами была составлена таблица для определения взаимосвязи процессов и КФУ, на основе данной таблицы были выбраны бизнес-процессы, обладающие высокой степенью важности и обладающие возможностью проведения изменений. Если начать программирование бизнес-процессов в соответствии с порядком, составленным на основе КФУ, первыми будут самые проблемные части технологического процесса. После окончания работы над ними, технологи смогут внедрить их на рабочем месте, тем самым оптимизировать работу уже на начальных стадиях создания программного комплекса.

Ключевые слова: автоматизированная система, программный комплекс, магнитно-импульсная обработка металлов, ключевые факторы успеха, программирование бизнес-процессов

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Громова Е. А., Хаймович И. Н., Летунова К. С., Елистратов Д. А. Создание автоматизированной системы магнитно-импульсной обработкой металлов на основе ключевого фактора успеха для подготовки технологов // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2023. Т. 19, № 1. С. 201-208. doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.019.202301.201-208>

© Громова Е. А., Хаймович И. Н., Летунова К. С., Елистратов Д. А., 2023



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



Creation of an Automated System for Magnetic-Pulsed Metal Processing on the Basis of a Key Success Factor for Training Technologists

E. A. Gromovaya*, I. N. Khaymovich, K. S. Letunova, D. A. Elistratov

Samara National Research University, Samara, Russian Federation

Address: 34 Moskovskoye shosse, Samara 443086, Russian Federation

*yazykova777@gmail.com

Abstract

The article presents a description of the organization of the process of creating an automated system for magnetic pulse metal processing (MPPM) based on key success factors (KSF). Pulse methods of material processing are a new direction in technology, which uses the energy of an explosion of a pulsed magnetic field (PMF), a high-voltage discharge in a liquid, and a number of other pulsed energy sources. Magnetic pulse metal processing requires careful safety measures, a serious approach in the design of basic and auxiliary equipment, as well as qualified and competent technologists. For reasons of these features, the task of creating an automated process control system becomes relevant. An automated system has a complex algorithm that includes a large number of business processes, in order to determine their programming order, it is necessary to compare the degree of importance of a particular business process with the key success factors for the MPPM process. It is possible to achieve a significant competitive advantage in the implementation of the strategy with the correct identification of critical success factors, we have compiled a table to determine the relationship between processes and KSF, based on this table, business processes have been selected that have a high degree of importance and have the ability to make changes. If you start programming business processes in accordance with the order compiled on the basis of KSF, the most problematic parts of the workflow will appear first. Once the work on them is completed, technologists will be able to implement them at the workplace, thereby optimizing work already in the initial stages of creating a software package.

Keywords: automated system, software package, magnetic-pulse processing of metals, key success factors, business process programming

Conflict of interests: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Gromovaya E.A., Khaymovich I.N., Letunova K.S., Elistratov D.A. Creation of an Automated System for Magnetic-Pulsed Metal Processing on the Basis of a Key Success Factor for Training Technologists. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2023;19(1):201-208. doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.019.202301.201-208>



1. Сущность технологического процесса магнитно-импульсной обработки металлов

1.1. Импульсные методы обработки материалов

Импульсные методы обработки материалов являются новым направлением в технике, в котором используется энергия взрыва импульсного магнитного поля (ИМП), высоковольтного разряда в жидкости и ряд других импульсных источников энергии. Все импульсные методы характеризуются высокой развиваемой мощностью, малым временем воздействия на объект обработки, простотой технологической оснастки, мобильностью и гибкостью при переходе к новой продукции. Это позволяет снизить затраты на производство продукции, а также решать новые технологические задачи, недоступные для других методов.

Магнитно-импульсная обработка металлов (МИОМ) требует тщательного соблюдения мер безопасности, серьезного подхода при проектировании основной и вспомогательной оснастки, а так же квалифицированных и компетентных технологов¹. Ввиду этих особенностей актуальной становится задача создания автоматизированной системы управления процессом [1-10].

1.2. Проектирование автоматизированной системы

В основу создания программного комплекса управления процессом на персональном компьютере легла автоматизированная информационная система (АИС). Эта система представляет методику расчета параметров МИОМ², которая включает 4 этапа.

1 этап – расчет механических характеристик процесса, позволяющий определить специфические особенности выполняемой технологической операции. Под особенностями подразумеваются работа деформации заготовки, кинетическая энергия деформируемого участка заготовки, величина давления ИМП, связь амплитудного значения давления ИМП и частотой колебаний разрядного тока.

2 этап – выбор оборудования. На данном этапе производится выбор магнитно-импульсной установки (МИУ), которая имеет энергоемкость не меньше расчетной величины энергии разряда.

3 этап – это расчет параметров индукторной системы, включающий выбор шага и количества витков индуктора. Исходными данными для расчета являются длина индуктора, собственная индуктивность МИУ, размеры заготовки и удельная электропроводность материалов индуктора и заготовки³.

4 этап – это расчет режима МИОМ, который заключается в определении энергии разряда МИУ.

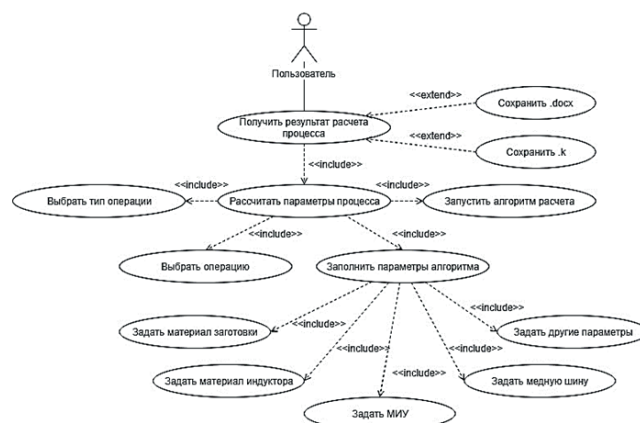
Методика содержит такие типы операций, как раздача трубча-

той заготовки, обжим трубчатой заготовки, деформирование листовой заготовки⁴.

Для разработки АИС был выбран язык моделирования UML (англ. Unified Modelling Language – унифицированный язык моделирования). Диаграммы, описанные этим графическим языком, прекрасно визуализируют любую предметную область, дают представление о функциональном назначении системы и ее структуре.

1.3. Диаграмма вариантов использования

Диаграмма вариантов использования (Use Case Diagram) отражает основную концептуальную модель системы в процессе ее проектирования и визуально описывает функциональные возможности системы⁵. Она не указывает подходы, используемые при проектировании. На рисунке 2 представлена диаграмма вариантов использования системы, в которой актером является пользователь. Ему предоставляется вариант взаимодействия с системой, а именно получить результат расчета процесса, но для этого необходимо сначала рассчитать параметры процесса.



Р и с. 1. Диаграмма вариантов использования системы для пользователя

Fig. 1. Diagram of system usage options for the user

Источник: здесь и далее в статье все рисунки составлены авторами.

Source: Hereinafter in this article all figures were made by the authors.

В основе построения программной системы лежит принцип, что для одного или нескольких алгоритмов расчета стоит в соответствии одна технологическая операция. На рисунке 2 изображена основная схема алгоритма в режиме пользователя. Расчет процесса формовки начинается с пункта расчета параметров индуктора и заканчивается рассчитать необходимую энергию МИУ, далее проверка перед расчетом параметров, необходимых для построения токовой кривой.

¹ Белый И. В., Фертик С. М., Хименко Л. Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. Харьков : Вища школа, 1977. 168 с.

² Горкин Л. Д., Хименко Л. Т. Экспериментальные исследования процесса магнитно-импульсной обработки металлов // Кузнечно-штамповочное производство. 1984. № 7. С. 4-6; Расчет параметров магнитного молота / Г. М. Лебедев, Ю. М. Овчинников, Ю. А. Попов [и др.] // Вопросы производства летательных аппаратов: Труды Куйбышевского авиационного института. 1970. Вып. 41. С. 18-22.

³ Мазуровский Б. Я., Сизев А. Н. Электрогидравлический эффект в листовой штамповке. Киев : Наукова думка, 1983. 192 с.

⁴ Глушечков В. А., Карпухин В. Ф. Инженерная методика расчета процессов магнитно-импульсной обработки материалов. Самара : Изд. дом «Федоров», 2018. 64 с.;

⁵ Jacobson I., Booch G., Rumbaugh J. The Unified Software Development Process. 1st ed. Addison-Wesley Professional, 1999. 463 p.





Р и с. 2. Основная схема алгоритм
F i g. 2. The main scheme of the algorithm

1.4. Моделирование в программном комплексе LS-DYNA

Токовая кривая – значения изменения разрядного тока во времени, эти данные используются для выполнения компьютерного моделирования в программном комплексе LS-DYNA, так как одной из основных областей применения LS-DYNA является моделирование различных процессов ОМД. Компьютерное моделирование позволяет оценить правильность выполнения проектируемой технологической операции по ее компьютерной модели, при необходимости можно внести изменения в режимы обработки, а также в конструкцию инструмента и оправки до их изготовления, избежав тем самым финансовых потерь [11-18].

2. Автоматизированная система управления на основе КФУ

2.1. Организация процесса создания автоматизированной системы управления на основе КФУ

Автоматизированная система имеет сложный алгоритм, включающий в себя большое количество бизнес-процес-

сов. Программирование такого рода комплекса – долгая трудоемкая работа, которая требует грамотной организации. Для определения порядка программирования необходимо сопоставить степень важности конкретного бизнес-процесса с ключевыми факторами успеха для процесса МИОМ [19-25].

Критические факторы успеха – это те стратегические задачи, конкурентные возможности, результаты деятельности, которые в технологическом процессе МИОМ должны обеспечивать или стремиться к этому, чтобы получить конкурентоспособный продукт и добиться успеха на рынке. Это те факторы, которым компания должна уделять особое внимание, так как именно они определяют успех или провал компании на рынке, ее конкурентные возможности, непосредственно влияющие на ее прибыльность от продукции.

Определение критических факторов успеха технологического процесса с учетом существующих и прогнозируемых тенденций развития информационной системы является важнейшей стратегической задачей. Автоматизированная система определяет те базы данных, которые наиболее важны при реализации. Можно достичь значительного конкурентного преимущества реализации стратегии при правильном определении критических факторов успеха. Критические факторы успеха в разных отраслях и для разных бизнесов различны. Кроме того, они со временем могут меняться в одной и той же отрасли под влиянием изменений общей ситуации в ней.

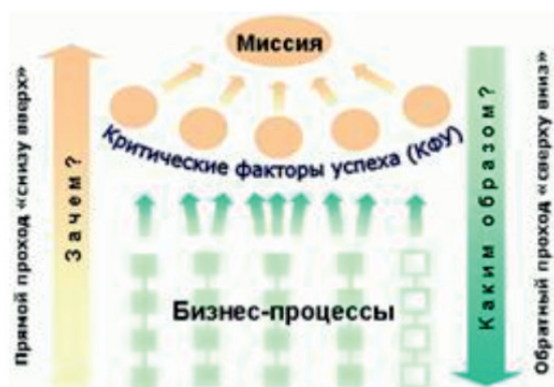
При разработке критических факторов успеха, нужно соблюдать правило необходимости и достаточности, согласно которому каждый критический фактор успеха необходим для достижения высокой эффективности автоматизированной системы технологического процесса, а все вместе факторы должны быть достаточны для ее достижения.

2.2. Сопоставление бизнес-процессов и критических факторов успеха

Для определения степени важности бизнес-процессов необходимо их сопоставление с критическими факторами успеха. Основная суть сопоставления сводится к тому, что по каждому бизнес-процессу нужно ответить на следующий вопрос: «Какие критические факторы успеха поддерживает данный бизнес-процесс»? Важность процесса определяется степенью его вклада в достижение стратегических целей компании, следовательно чем больше критических факторов успеха поддерживает рассматриваемый бизнес-процесс, тем больше его важность.

На рисунке 3 при поиске взаимосвязи между процессами и КФУ был применен прямой проход «снизу вверх» или «от процессов к КФУ». На практике необходимо проделать и обратный проход «сверху вниз» или «от КФУ к процессам», при котором для каждого критического фактора успеха определяются бизнес-процессы, их поддерживающие. Второй проход повысит качество получаемых результатов, а также поможет выявить бизнес-процессы, которых в компании на данный момент времени не существует, но для реализации стратегии они необходимы.





Р и с. 3. Сопоставление бизнес-процессов и критических факторов успеха

Fig. 3. Comparing business processes and critical success factors

После расчета степени возможности проведения изменений в бизнес-процессах эту величину нужно ввести в матрицу ранжирования как третье измерение, в результате чего получится трехмерный куб, из которого нужно выбрать бизнес-процессы, являющиеся самыми важными, самыми проблемными и обладающие высокой степенью возможности проведения изменений [10, 11].

Взаимосвязь процессов и КФУ для технологического процесса МИОМ представлена на таблице 1, где ключевыми факторами успеха выступают: повышение производительности, уменьшение издержек, сокращение жизненного цикла изделия, повышение качества продукции, повышение качества обслуживания, высококвалифицированные и мотивированные сотрудники, уровень цифровизации справочных данных.

Т а б л и ц а 1. Взаимосвязь процессов и КФУ для технологического процесса МИОМ

Table 1. The relationship of processes and a key success factor for the technological process of magnetic-pulse processing of metals⁶

Процессы	КФУ								
	Повыш. производительности	Уменьшен. издержек	Сокращение жизненного цикла изделия	Повышение качества продукции	Повышение качества обслуж.	Высококвалифицированные и мотивированные сотрудники	Уровень цифровизации справочных данных	Кол-во КФУ	Оценка работы
Анализ контракта	x	x	x		x			4	3
Согласов. проекта	x	x	x		x			3	3
Проектир. инструм. (оснастки, приспособлений)	x	x	x	x	x	x	x	7	5
Изготовл. инструм. (оснастки, приспособлений)				x	x		x	3	1
Освоение				x	x		x	3	1

Источник: составлено авторами.

Source: Compiled by the authors.

Если начать программирование бизнес - процессов в соответствии с порядком, составленным на основе КФУ, первыми будут самые проблемные части технологического процесса. После окончания работы над ними, технологи смогут внедрить их на рабочем месте, тем самым оптимизировать работу уже на начальных стадиях создания программного комплекса.

3. Выводы

На основе исследования взаимосвязи процессов и ключевого фактора успеха для технологического процесса МИОМ последовательность внедрения бизнес-процессов следующая: проектирование инструмента, анализ контракта, согласование проекта, изготовление инструмента, освоение. Данный порядок внедрения программируемых бизнес-процессов в производство обеспечит оптимизацию работы технолога в самых проблемных частях процесса.

⁶ КФУ is a Key Success Factor, МИОМ – Magnetic Pulse Processing of Metals



Список использованных источников

- [1] Electromagnetic forming – A review / V. Psyk, D. Risch, B. L. Kinsey [и др.] // *Journal of Materials Processing Technology*. 2011. Vol. 211, issue 5. P. 787-829. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012>
- [2] Glushchenkov V., Karpukhin V., Pesotsky V. Achievements in magnetic pulse welding and assembly of tubular structures // *Proceedings of The International Conference on the Joining of Materials: JOM-6*. Helsingor, Denmark : European Institute for the Joining of Materials, 1993. P. 473-484.
- [3] Совершенствование способа магнитно-импульсной обработки алюминиевых расплавов / Д. Г. Черников, В. А. Глушченков, И. Р. Сулейманова [и др.] // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2014. Т. 16, № 6. С. 256-262. EDN: TIKADT
- [4] Белый И. В., Остроумов Г. В., Фертик С. М. Давление на тонкостенную заготовку при обработке ее импульсным магнитным полем // *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Магнитно-импульсная обработка металлов*. 1971. № 1. С. 3-15.
- [5] Громова Е. А., Хаймович И. Н. Разработка тренажера автоматизированного рабочего места технолога для проектирования технологических процессов магнитно-импульсной обработки металлов // *Современные информационные технологии и ИТ-образование*. 2021. Т. 17, № 3. С. 649-657. <https://doi.org/10.25559/SITITO.17.202103.649-657>
- [6] Черников Д. Г., Карпукhin В. Ф., Глушченков В. А. Исследование процесса магнитно-импульсной формовки с учетом эффекта просачивания магнитного поля сквозь заготовку // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2020. Т. 22, № 2(94). С. 75-80. <https://doi.org/10.37313/1990-5378-2020-22-2-75-80>
- [7] Карпукhin В. Ф. Определение параметров магнитно-импульсной формовки // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета)*. 2012. № 5-1(36). С. 228-232. [https://doi.org/10.18287/2541-7533-2012-0-5-1\(36\)-228-232](https://doi.org/10.18287/2541-7533-2012-0-5-1(36)-228-232)
- [8] Belyaeva I. A., Glushchenkov V.A. Hybrid Static and Magnetic-Pulsed Loading in Sheet Stamping // *Russian Engineering Research*. 2020. Vol. 40, no. 3. P. 214-217. <https://doi.org/10.3103/S1068798X20030077>
- [9] Changes in the Structure of the Benzylpenicillin Sodium Salt Molecule under the Pulsed Magnetic Field / N. A. Rodenko, V. A. Zhukova, T. I. Vasilyeva [и др.] // *Journal of Biomedical Photonics and Engineering*. 2021. Vol. 7, no. 1. Article number: 010305. <https://doi.org/10.18287/JBPE21.07.010305>
- [10] Changes in the Antibacterial Activity of Benzylpenicillin Exposed to a Pulsed High-Intensity Magnetic Field / V. A. Glushchenkov, T. I. Vasilyeva, P. P. Purigin [и др.] // *BIOPHYSICS*. 2019. Vol. 64, issue 2. P. 214-223. <https://doi.org/10.1134/S0006350919020088>
- [11] Теоретическое и экспериментальное обоснование обработки расплавов на основе алюминия импульсными магнитными полями / К. В. Никитин, Е. А. Амосов, В. И. Никитин [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. 2015. № 5. С. 11-19. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2015-5-11-19>
- [12] Pandelidis I., Zou Q. Optimization of injection molding design // *Polymer Engineering & Science*. 1990. Vol. 30, issue 15. P. 873-882. <https://doi.org/10.1002/pen.760301502>
- [13] Batygin Yu. V., Chaplygin E. A., Sabokar O. S. Magnetic pulsed processing of metals for advanced technologies of modernity – a brief review // *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2016. No. 5. P. 35-39. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2016.5.05>
- [14] Yin Y.F. Modeling and Analysis of Process Parameters for Plastic Injection Molding of Base-Cover // *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 602-604. P. 1930-1933. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.602-604.1930>
- [15] Fetecau C., Postolache I., Stan F. Numerical and Experimental Study on the Injection Moulding of a Thin-Wall Complex Part // *Proceedings of the ASME 2008 International Manufacturing Science and Engineering Conference collocated with the 3rd JSME/ASME International Conference on Materials and Processing*. ASME 2008 International Manufacturing Science and Engineering Conference. Vol. 1. Evanston, Illinois, USA : ASME, 2008. P. 85-93. https://doi.org/10.1115/MSEC_ICMP2008-72196
- [16] Min B. H. A study on quality monitoring of injection-molded parts // *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. Vol. 136, issue 1-3. P. 1-6. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00445-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00445-4)
- [17] Monitoring and dynamic control of quality stability for injection molding process / X. Zhou [и др.] // *Journal of Materials Processing Technology*. 2017. Vol. 249. P. 358-366. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.05.038>
- [18] Joining of Copper to Brass Using Magnetic Pulse Welding / T. Baaten [и др.] // *Proceedings of the 4th International Conference on High Speed Forming – ICHSF 2010*. Columbus, Ohio, USA, 2010. P. 84-96. <https://doi.org/10.17877/DE290R-8664>
- [19] Компьютерный тренажер для установки и снятия детали со станка ДИП-400 / Е. В. Ершов, Л. Н. Виноградова, С. В. Челнокова, А. С. Мартюгов // *Вестник Череповецкого государственного университета*. 2019. № 1(88). С. 20-26. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2019-1-88-2>
- [20] Орлов А. А., Тимченко С. Н., Сидоренко В. С. Архитектура и принципы построения компьютерного тренажера разделительного производства // *Перспективные материалы*. 2013. № S14. С. 78-82. EDN: RBVTDN
- [21] Khaimovich I. N., Khaimovich A. I., Kovalkova E. A. Automatisation of Calculation Method of Technological Parameters of Wiredrawing with Account of Speed Factor and Material Properties // *Solid State Phenomena*. 2020. Vol. 299. P. 552-558. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.299.552>



- [22] Khaimovich I. N., Frolov M. A. Improvement of Technological Process of Multiproduct Production on the Bases of Simulation Modeling of Production Unit // *Key Engineering Materials*. 2016. Vol. 684. P. 487-507. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.684.487>
- [23] Khaimovich I. N., Khaimovich A. I. Computer-Aided Engineering of the Process of Injection Molding Articles Made of Composite Materials // *Key Engineering Materials*. 2017. Vol. 746. P. 269-274. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.746.269>
- [24] Khaimovich I. N. CAD system of design and engineering provision of die forming of compressor blades for aircraft engines // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. Vol. 87, issue 8. Article number: 082024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/87/8/082024>
- [25] Comparative analysis of functional possibilities of methods of pulse treatment of a melt / V. N. Tsurkin, A. V. Ivanov, S. S. Cherepovskii [и др.] // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2016. Vol. 52. P. 181-185. <https://doi.org/10.3103/S1068375516020149>

Поступила 07.11.2022; одобрена после рецензирования 14.12.2022; принята к публикации 23.01.2023.

Об авторах:

Громова Екатерина Аркадьевна, аспирант, ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (443086, Российская Федерация, г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 34), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8801-2388>**, uazykova777@gmail.com

Хаймович Ирина Николаевна, профессор кафедры обработки металлов давлением, ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (443086, Российская Федерация, г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 34), доктор технических наук, профессор, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8798-3745>**, kovalek68@mail.ru

Летунова Ксения Сергеевна, аспирант, ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (443086, Российская Федерация, г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 34), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3172-6587>**, kseniamorozova01@gmail.com

Елистратов Данил Андреевич, аспирант, ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (443086, Российская Федерация, г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 34), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5361-3738>**, dan.elistratow@gmail.com

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

References

- [1] Psyk V., Risch D., Kinsey B.L., Tekkaya A.E., Kleiner M. Electromagnetic forming – A review. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011;211(5):787-829. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012>
- [2] Glushchenkov V., Karpukhin V., Pesotsky V. Achievements in magnetic pulse welding and assembly of tubular structures. In: *Proceedings of The International Conference on the Joining of Materials: JOM-6*. Helsingor, Denmark: European Institute for the Joining of Materials; 1993. p. 473-484.
- [3] Chernikov D., Glushchenkov V., Suleimanova I., Nikitin V., Nikitin K. Improvements in the method of magnetic-pulse processing of aluminum melts. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2014;16(6):256-262. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: TIKADT
- [4] Bely I.V., Ostroumov G.V., Fertik S.M. *Davlenie na tonkostennuju zagotovku pri obrabotke ee impul'snym magnitnym polem* [Pressure on a thin-walled workpiece when processing it with a pulsed magnetic field]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI" A series of "Magnetic Pulse Metal Processing"*. 1971;(1):3-15. (In Russ.)
- [5] Gromovaya E.A., Khaimovich I.N. Development of a Simulator of an Automated Workplace of a Technologist for the Design of Technological Processes of Magnetic Pulse Metal Working. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2021;17(3):649-657. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25559/SITITO.17.202103.649-657>
- [6] Chernikov D., Karpukhin V., Glushchenkov V. Study of the process of electromagnetic forming with consideration for the effect of magnetic field penetration through the workpiece. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2020;22(2):75-80. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.37313/1990-5378-2020-22-2-75-80>
- [7] Karpukhin V. Determination of parameters of pulse-magnetic forming. *Vestnik of Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University)*. 2012;(5-1):228-232. (In Russ., abstract in Eng.) [https://doi.org/10.18287/2541-7533-2012-0-5-1\(36\)-228-232](https://doi.org/10.18287/2541-7533-2012-0-5-1(36)-228-232)
- [8] Belyaeva I.A., Glushchenkov V.A. Hybrid Static and Magnetic-Pulsed Loading in Sheet Stamping. *Russian Engineering Research*. 2020;40(3):214-217. <https://doi.org/10.3103/S1068798X20030077>
- [9] Rodenko N.A., Zhukova V.A., Vasilyeva T.I., Glushchenkov V.A., Belyaeva I.A. Changes in the Structure of the Benzylpenicillin Sodium Salt Molecule under the Pulsed Magnetic Field. *Journal of Biomedical Photonics and Engineering*. 2021;7(1): 010305. <https://doi.org/10.18287/JBPE21.07.010305>



- [10] Glushchenkov V.A., Vasilyeva T.I., Purigin P.P., Belyaeva I.A., Rodenko N.A., Madyarova A.K., Jusupov R.Ju. Changes in the Antibacterial Activity of Benzylpenicillin Exposed to a Pulsed High-Intensity Magnetic Field. *BIOPHYSICS*. 2019;64(2):214-223. <https://doi.org/10.1134/S0006350919020088>
- [11] Nikitin K.V., Amosov E.A., Nikitin V.I., Glushchenkov V.A., Chernikov D.G. *Teoreticheskoe i eksperimental'noe obosnovanie obrabotki rasplavov na osnove alyuminiya impul'snymi magnitnymi polyami* [Theoretical and experimental substantiation of treatment of aluminum-based melts by pulsed magnetic fields]. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2015;(5):11-19. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2015-5-11-19>
- [12] Pandelidis I., Zou Q. Optimization of injection molding design. *Polymer Engineering & Science*. 1990;30(15):873-882. <https://doi.org/10.1002/pen.760301502>
- [13] Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Sabokar O.S. Magnetic pulsed processing of metals for advanced technologies of modernity – a brief review. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2016;(5):35-39. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2016.5.05>
- [14] Yin Y.F. Modeling and Analysis of Process Parameters for Plastic Injection Molding of Base-Cover. *Advanced Materials Research*. 2012;(602-604):1930-1933. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.602-604.1930>
- [15] Fetecau C., Postolache I., Stan F. Numerical and Experimental Study on the Injection Moulding of a Thin-Wall Complex Part. In: Proceedings of the ASME 2008 International Manufacturing Science and Engineering Conference collocated with the 3rd JSME/ASME International Conference on Materials and Processing. ASME 2008 International Manufacturing Science and Engineering Conference. Vol. 1. Evanston, Illinois, USA: ASME; 2008. p. 85-93. https://doi.org/10.1115/MSEC_ICMP2008-72196
- [16] Min B.H. A study on quality monitoring of injection-molded parts. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003;136(1-3):1-6. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00445-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00445-4)
- [17] Zhou X., Zhang Y., Mao T., Zhou H. Monitoring and dynamic control of quality stability for injection molding process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017;249:358-366. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.05.038>
- [18] Baaten T., Debroux N., De Waele W., Faes K. Joining of Copper to Brass Using Magnetic Pulse Welding. In: Proceedings of the 4th International Conference on High Speed Forming – ICHSF 2010. Columbus, Ohio, USA; 2010. p. 84-96. <http://dx.doi.org/10.17877/DE290R-8664>
- [19] Ershov E.V., Vinogradova L.N., Chelnokova S.V., Martyugov A.S., Computer simulator for installation and removing of part from machine DIP-400. *Cherepovets State University Bulletin*. 2019;(1):20-26. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2019-1-88-2>
- [20] Orlov A.A., Timchenko S.N., Sidorenko V.S. *Arhitektura i principy postroeniya komp'yuternogo trenazhera razdelitel'nogo proizvodstva* [Architecture and principles of building a computer simulator for separation production]. *Perspektivnye Materialy*. 2013;(S14):78-82. (In Russ.) EDN: RBVTDN
- [21] Khaimovich I.N., Khaimovich A.I., Kovalkova E.A. Automatisation of Calculation Method of Technological Parameters of Wire Drawing with Account of Speed Factor and Material Properties. *Solid State Phenomena*. 2020;299:552-558. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.299.552>
- [22] Khaimovich I.N., Frolov M.A. Improvement of Technological Process of Multiproduct Production on the Bases of Simulation Modeling of Production Unit. *Key Engineering Materials*. 2016;684:487-507. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.684.487>
- [23] Khaimovich I.N., Khaimovich A.I. Computer-Aided Engineering of the Process of Injection Molding Articles Made of Composite Materials. *Key Engineering Materials*. 2017;746:269-274. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.746.269>
- [24] Khaimovich I.N. CAD system of design and engineering provision of die forming of compressor blades for aircraft engines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017;87(8):082024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/87/8/082024>
- [25] Tsurkin V.N., Ivanov A.V., Cherepovskii S.S., Vasyanovich N.A. Comparative analysis of functional possibilities of methods of pulse treatment of a melt. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2016;52:181-185. <https://doi.org/10.3103/S1068375516020149>

Submitted 07.11.2022; approved after reviewing 14.12.2023; accepted for publication 23.01.2023.

About the authors:

Ekaterina A. Gromovaya, Postgraduate student, Samara National Research University (34 Moskovskoye shosse, Samara 443086, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8801-2388>, yazykova777@gmail.com

Irina N. Khaimovich, Professor of the Metal Press Department, Samara National Research University (34 Moskovskoye shosse, Samara 443086, Russian Federation), Dr. Sci. (Tech.), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8798-3745>, kovalek68@mail.ru

Kseniia S. Letunova, Postgraduate student, Samara National Research University (34 Moskovskoye shosse, Samara 443086, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3172-6587>, kseniamorozova01@gmail.com

Danil A. Elistratov, Postgraduate student, Samara National Research University (34 Moskovskoye shosse, Samara 443086, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5361-3738>, dan.elistratow@gmail.com

All authors have read and approved the final manuscript.

