

Разработка тренажера автоматизированного рабочего места технолога для проектирования технологических процессов магнитно-импульсной обработки металлов

Е. А. Громова*, И. Н. Хаймович

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

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

* yazykova777@gmail.com

Аннотация

В статье представлено описание компьютерного тренажера автоматизированного рабочего места технолога для проектирования технологических процессов магнитно-импульсной обработки металлов (МИОМ). Тренажер был создан на основе автоматизированной информационной системы (АИС) расчета параметров процессов МИОМ, которая включает в себя новую универсальную методику расчета параметров МИОМ. Данная методика имеет 4 этапа. На первом этапе происходит расчет механических характеристик процесса, позволяющий определить специфические особенности выполняемой технологической операции. Под особенностями подразумеваются работа деформации заготовки, кинетическая энергия деформируемого участка заготовки, величина давления импульсного магнитного поля (ИМП), связь амплитудного значения давления ИМП и частотой колебаний разрядного тока. На втором этапе происходит выбор магнитно-импульсной установки (МИУ). На третьем этапе производится 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 заготовки. Четвертый этап – это расчет режима МИОМ, который заключается в определении энергии разряда МИУ. Для визуализации процесса используется программный комплекс LS-DYNA. Компьютерный тренажер предназначен для использования в учебном процессе и на производстве для переподготовки кадров, повышения уровня квалификации или аттестации.

Ключевые слова: компьютерный тренажер, программный комплекс, магнитно-импульсная обработка металлов, инженерная методика расчета, параметры процесса, автоматизированная информационная система

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Громова, Е. А. Разработка тренажера автоматизированного рабочего места технолога для проектирования технологических процессов магнитно-импульсной обработки металлов / Е. А. Громова, И. Н. Хаймович. – DOI 10.25559/SITITO.17.202103.649-657 // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2021. – Т. 17, № 3. – С. 649-657.

© Громова Е. А., Хаймович И. Н., 2021



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



Development of a Simulator of an Automated Workplace of a Technologist for the Design of Technological Processes of Magnetic Pulse Metal Working

E. A. Gromovaya*, I. N. Khaimovich

Samara National Research University, Samara, Russian Federation

34 Moskovskoye shosse, Samara 443086, Russian Federation

* yazykova777@gmail.com

Abstract

The article presents a description of a computer simulator of a technologist's automated workplace for designing technological processes of magnetic-pulse metal processing (MPMP). The simulator was based on an automated information system (AIS) for calculating the parameters of the MPMP processes, which includes a new universal method for calculating the parameters of the MPMP. This method has 4 stages. At the first stage, the mechanical characteristics of the process are calculated, which makes it possible to determine the specific features of the technological operation being performed. These features refer to the work of deformation of the workpiece, the kinetic energy of the deformed section of the workpiece, the magnitude of the pressure of the pulsed magnetic field (PMF), the relationship between the amplitude value of the PMF pressure and the oscillation frequency of the discharge current. At the second stage, a magnetic-pulse installation (MPI) is selected. At the third stage, the parameters of the inductor system are calculated, including the choice of the pitch and the number of turns of the inductor. The initial data for the calculation are the length of the inductor, the intrinsic inductance of the MPI, the dimensions of the workpiece, and the specific electrical conductivity of the materials of the inductor and the workpiece. The fourth stage is the calculation of the MPMP mode, which consists in determining the discharge energy MPI. The LS-DYNA software package is used to visualize the process. The computer simulator is intended for use in the educational process and in production for retraining of personnel, advanced training or certification.

Keywords: computer simulator, software package, magnetic pulse metal processing, engineering calculation methodology, process parameters, automated information system

The authors declare no conflict of interest.

For citation: 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. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*. 2021; 17(3):649-657. DOI: <https://doi.org/10.25559/SITITO.17.202103.649-657>



Введение

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.

Общими недостатками импульсных методов является повышенная опасность, связанная с использованием взрывоопасных материалов или высоких напряжений, шумовой эффект, который часто сопровождается такими процессами, что обусловлено выделением большой энергии в малом объеме за короткие промежутки времени. Эти особенности импульсных методов требуют тщательного соблюдения мер безопасности, серьезного подхода при проектировании основной и вспомогательной оснастки, а так же квалифицированных и компетентных технологов.

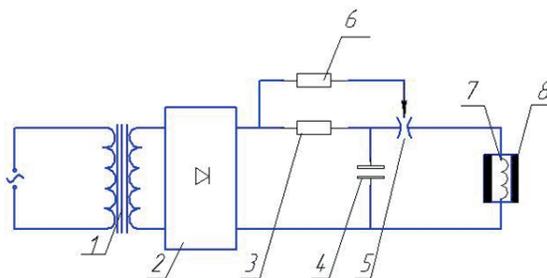
1.2 Физическая сущность процесса магнитно-импульсной обработки металлов (МИОМ)

МИОМ получила широкое практическое применение на различных машиностроительных предприятиях. Так, МИОМ применяется при производстве различных изделий, от аэрокосмической и автомобильной техники до товаров народного потребления. Среди операций обработки металлов давлением наиболее эффективными для данного метода являются процессы формовки и калибровки трубчатых и плоских деталей. Процессы магнитно-импульсной формовки позволяют изготавливать детали типа конусов и переходников, производить отбортовку концевых участков труб и отверстий на плоских заготовках. Магнитно-импульсная калибровка позволяет повысить точность изготовления деталей за счет силового и термического воздействия на обрабатываемую деталь [1]. Дальнейшее расширение области ее использования сдерживается отсутствием обоснованных рекомендаций по проектированию технологических процессов, инструмента и оснастки. Это вызывает необходимость проведения большого количества экспериментов по отработке режимов обработки, конструкции инструмента и оснастки, а также подготовки специалистов¹.

Процесс МИОМ основан на преобразовании энергии, запасенной в накопителе (емкостном, индуктивном), в работу пластической деформации. Подавляющее большинство существующих в настоящее время и проектируемых установок для обработки металлов с использованием ИМП имеет емкостный накопитель энергии – батарею конденсаторов. В качестве коммутационного устройства обычно используется трехэлектродные управляемые разрядники (вакуумные, воздушные

или газонаполненные), достоинствами которых по сравнению с механическими ключами является большая пропускная способность (до нескольких МА), малое собственное индуктивное и активное сопротивление, сравнительная легкость осуществления синхронизации при параллельной работе нескольких разрядников на одну нагрузку [2; 3].

Принципиальная схема установки с емкостным накопителем энергии и трехэлектродным разрядником, используемым в качестве коммутационного устройства, показана на рисунке 1, где 1 – повышающий трансформатор, 2 – выпрямитель тока, 3 – зарядное сопротивление, 4 – батарея конденсаторов, 5 – разрядник, 6 – регулятор запасаемой энергии, 7 – индуктор, 8 – заготовка².



Р и с. 1. Принципиальная схема магнитно-импульсной установки

Fig. 1. Schematic diagram of the magnetic-pulse installation

При включении установки в сеть конденсаторная батарея 4 с помощью зарядно-выпрямительного устройства, включающего в себя повышающий трансформатор 1, выпрямитель тока 2 и зарядное сопротивление 3, заряжается до заданного регулятором запасаемой энергии 6 напряжения [3]. При достижении на конденсаторной батарее соответствующего напряжения на поджигающий электрод трехэлектродного разрядника 5 от специальной схемы подается высоковольтный поджигающий импульс, инициирующий электрический пробой рабочего промежутка разрядника и коммутационный разрядную цепь. Импульс тока, проходящий через индуктор 7, образует магнитное поле, которое наводит в стенках обрабатываемой заготовки 8 электродвижущую силу. В результате взаимодействия вихревого тока в детали с полем индуктора возникает сила, стремящаяся деформировать заготовку в матрицу. Таким образом, при штамповке металлов с использованием энергии ИМП роль инструмента (пуансона) выполняет магнитное поле индуктора.

Материалы обрабатываемых деталей не являются совершенным проводником и обладают некоторым активным сопротивлением, поэтому неизбежно проникновение магнитного поля в заготовку и связанные с этим потери энергии на рассеивание и на нагрев заготовки. Глубина проникновения магнитного поля в металл заготовки зависит от электропроводности материала и параметров поля (скорости нарастания, длительности). Наиболее предпочтительным для МИОМ являются заготовки из материала, имеющего низкое удельное электросопротивление, такого, как медь, алюминий и их

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

² Магнитно-импульсная обработка материалов (МИОМ) / А. Б. Прокофьев, И. А. Беляева, В. А. Глушников [и др.]. Самара: Изд-во СамНЦ РАН», 2019. С. 7.



сплавы. Эффективность обработки металлов энергией ИМП по мере возрастания их удельного электросопротивления уменьшается, то есть для достижения необходимых давлений требуется увеличение энергоемкости установок или улучшение параметров установки в сторону увеличения круговой частоты разряда³. Силы, приложенные к заготовке, имеют импульсный характер с длительностью, исчисляемой тысячными и даже миллионными долями секунды, вследствие чего имеет место концентрация большой мощности и достигаются высокие давления до 150 ... 500 МПа.

1.3 Инженерные методики для расчета параметров процесса МИОМ

Процессы, происходящие в системе «индуктор-заготовка», носят сложный взаимосвязанный характер. В связи с этим при проектировании технологических процессов МИОМ необходимо использовать инженерные методики расчета основных параметров. Существует несколько инженерных методик расчета⁴ [2], но наиболее широкое распространение получили две инженерные методики, разработанные сотрудниками Харьковского политехнического института [4] и Чувашского государственного университета [5].

Расчеты, выполненные по первой методике, носят скорее оценочный характер, так как практически не учитывают электрические параметры процессов МИОМ. Вторая же методика расчета более полно учитывает электрические параметры процесса, однако рекомендации авторов данной методики по выбору величины необходимого давления ИМП на заготовку носят самый общий характер и не учитывают специфику выполняемой операции.

На базе последней методики в лаборатории «Прогрессивные процессы пластического деформирования» (НИЛ-41) Самарского университета была разработана новая методика расчета параметров процессов МИОМ⁵, которая позволяет разработать технологические процессы магнитно-импульсной формовки, калибровки и сборки тонкостенных деталей, осуществлять подбор оборудования, определять оптимальные параметры инструмента-индуктора и рассчитывать необходимый режим обработки деталей. Данная методика является наиболее универсальной, однако ее применение на практике сдерживается высокой трудоемкостью расчета «вручную», а также высокой вероятностью возникновения ошибки вследствие достаточно сложных алгоритмов и большого объема вычислений. Данная методика является наиболее универсальной, она и была взята за основу при разработке автоматизированной информационной системы (АИС) для автоматизации проектирования новых технологических процессов [6-10].

1.4 Универсальная методика расчета параметров МИОМ

Согласно данной методике, расчет параметров процесса МИОМ можно разделить на 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 – это выбор МИУ. На данном этапе производится выбор 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 заготовки.

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

Разработка автоматизированного рабочего места технолога

2.1 Проектирование автоматизированной информационной системы

На основе ранее известных методик была разработана новая методика расчета процессов магнитно-импульсной формовки типовых деталей из трубчатых заготовок. На базе данной методики создана автоматизированная информационная система (АИС) расчета на персональном компьютере.

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 структуре⁶.

2.2 Диаграмма вариантов использования

Диаграмма вариантов использования (Use Case Diagram) отражает основную концептуальную модель системы в процессе ее проектирования и визуально описывает функциональные возможности системы⁷. 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.

³ Горкин Л. Д., Хименко Л. Т. Экспериментальные исследования процесса магнитно-импульсной обработки металлов // Кузнечно-штамповочное производство. 1984. №7. С. 4-6.

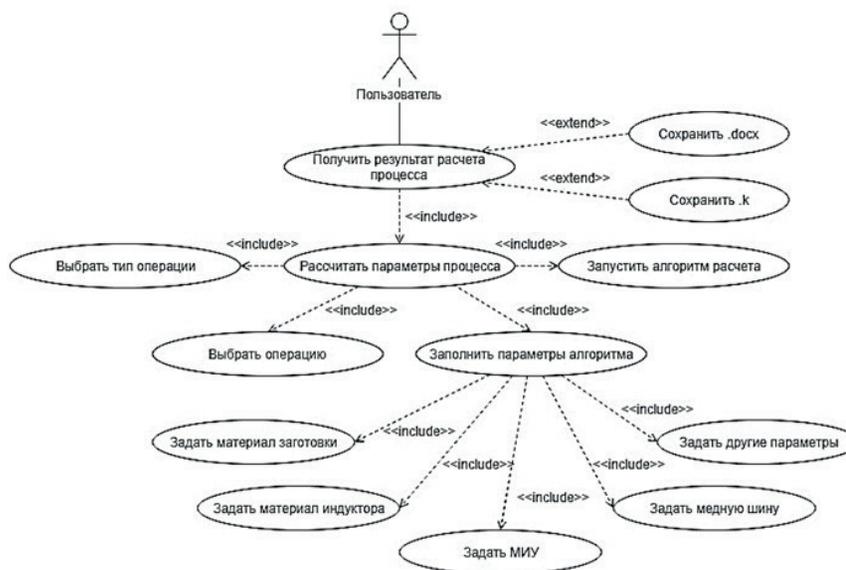
⁴ Мазуровский Б. Я., Сизев А. Н. Электрогидравлический эффект в листовой штамповке. Киев: Наукова думка, 1983. 192 с.

⁵ Глушченко В. А., Карпунин В. Ф. Инженерная методика расчета процессов магнитно-импульсной обработки материалов. Самара: Изд. дом «Федоров», 2018. 64 с.

⁶ Rumbaugh J., Jacobson I., Booch G. The Unified Modeling Language Reference Manual. 2nd ed. Addison-Wesley Professional, 2010. 721 p.

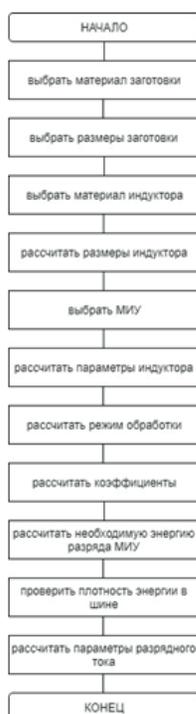
⁷ Jacobson I., Booch G., Rumbaugh J. The Unified Software Development Process. 1st ed. Addison-Wesley Professional, 1999. 463 p.





Р и с. 2. Диаграмма вариантов использования системы для пользователя
F i g. 2. Diagram of system usage options for the user

На рисунке 3 изображена основная схема алгоритма в режиме пользователя. Расчет процесса формовки начинается с пункта «расчет параметров индуктора» и заканчивается «рассчитать необходимую энергию разряда МИУ», далее проверка перед расчетом параметров, необходимых для построения токовой кривой.



Р и с. 3. Основная схема алгоритма
F i g. 3. The main scheme of the algorithm

2.3 Разработка программного комплекса

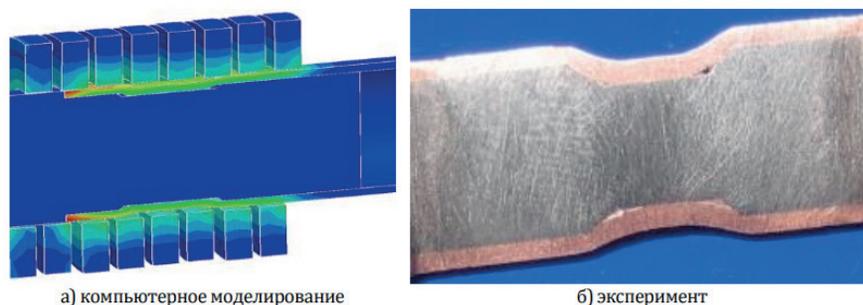
Основным требованием при выборе языка программирования была его кроссплатформенность. Много языков удовлетворяли данному требованию, но выбор пал на язык Java. Для написания интерпретатора был выбран Groovy. Разрабатываемая система может функционировать на любой операционной системе (Windows 10, Linux и т.д.), единственным условием для корректной работы является наличие JVM (Java Virtual Machine) на компьютере. Для корректного функционирования системы необходимо:

- объем ОЗУ – не менее 2 Гб;
- объем свободного дискового пространства – не менее 20 Гб;
- разрешение экрана – не менее 1024 × 768 точек;
- мышь или иное манипулирующее устройство.

2.4 Компьютерное моделирование процессов МИОМ в программном комплексе LS-DYNA

После использования АИС, пользователь получает рассчитанные значения изменения разрядного тока во времени – токовую кривую. Это необходимо для выполнения компьютерного моделирования в программном комплексе LS-DYNA. Одной из основных областей применения LS-DYNA является моделирование различных процессов ОМД, например, листовой штамповки, прокатки, прессования,ковки, волочения и т.п. 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. На рисунке 4 показаны результаты апробации использования АИС на примере операции магнитно-импульсной сборки.





Р и с. 4. Магнитно-импульсная сборка
F i g. 4. Magnetic-impulse assembly

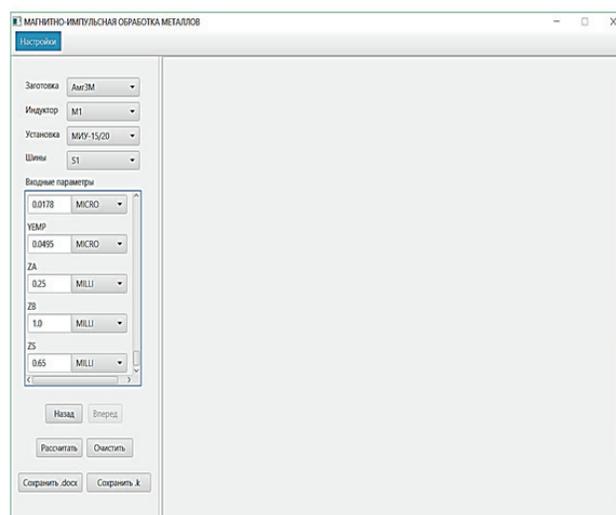
Компьютерный тренажер для проектирования технологических процессов магнитно-импульсной обработки металлов

В настоящее время подготовка кадров привлекает большое внимание руководства организаций. От качества подготовки напрямую зависит успех любого предприятия. Современные технологии позволяют внедрять новые системы обучения, которые смогут служить как для повышения уровня подготовки персонала, так и для обучения студентов в ВУЗе.

Обучение персонала на имеющемся производственном оборудовании зачастую неоправданно затратное и опасное из-за риска получения травмы. В то же время компьютерная симуляция лишена этих недостатков и позволяет безопасно и наглядно ознакомить начинающего специалиста с производственным оборудованием. Кроме того, приобрести компьютерный симулятор зачастую дешевле, чем выделить реальную производственную единицу для обучения. В настоящее время наиболее востребованным способом обучения и аттестации сотрудников, работающих в металлургической промышленности, является имитация производственного процесса или его части в виде компьютерного тренажера [11-17]. Благодаря автоматизации всего технологического процесса снижен человеческий фактор, обучение проходит безопасно и эффективно⁸. Форма организации учебного процесса по инженерным специальностям предполагает создание таких условий, при которых студенты имели бы возможность непосредственно, в том числе и самостоятельно, анализировать изучаемые явления и процессы, устанавливая связи между явлениями, осознавать логику, последовательность действий, сопоставлять ранее изученное с новыми знаниями и использовать их для осмысления и решения проблемных ситуаций⁹. Использование тренажера на лабораторных работах в ВУЗах качественно повысит

уровень знаний, умений, навыков и профессиональный подготовки студентов.

Аппаратная составляющая тренажера – персональный компьютер, программное обеспечение – автоматизированная информационная система (АИС) расчета процессов МИОИ, программный комплекс LS-DYNA для визуализации [18-25]. Ввод и вывод информации производится согласно разработанному алгоритму АИС, тренажер понятен и прост в использовании, его интерфейс можно увидеть на рисунке 5.



Р и с. 5. Форма пользователя в режиме заполнения параметров
F i g. 5. User form in parameter filling mode

В рамках лабораторной работы можно предложить обучающимся вручную рассчитать параметры процесса и сравнить данные с результатами расчета в программном комплексе. Ре-

⁸ Захарова Н. А., Михайлова О. В. Компьютерный тренажер для обучения операторов технологических процессов [Электронный ресурс] // Молодежный научный форум: Технические и математические науки. М.: МЦНО, 2013. № 4(4). С. 26-30. URL: [http://www.nauchforum.ru/archive/MNF_tech/4\(4\).pdf](http://www.nauchforum.ru/archive/MNF_tech/4(4).pdf) (дата обращения: 29.07.2021).

⁹ Черный А. П., Ромененко Св. С., Коваль Т. П., Сивякова Г. А. Компьютеризированная система для удаленного управления электрооборудованием и выполнения лабораторных практикумов на основе виртуальных лабораторных комплексов [Электронный ресурс] // Achievement of High School – 2015: Материалы за 11-а международна научна практична конференция. София: Бялград-БГ ООД, 2015. С. 13-19. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25533710> (дата обращения: 29.07.2021).



зультаты работы на тренажере могут быть сохранены студентами и представлены в виде отчета по лабораторной работе.

Выводы

В ходе работы была спроектирована и реализована автоматизированная система расчета параметров процессов магнитно-импульсной обработки металлов. В процессе анализа предметной области был проведен обзор существующих инженерных методик и создана логическая модель проекта системы. За основу АС была взята универсальная методика расчета, которая в полном объеме может учитывать, как теоретические стороны расчета, так и более конкретные технические аспекты процесса. Компьютерный тренажер представляет собой комплексную работу АИС и программный комплекс LS-DYNA для визуализации процесса.

Компьютерный тренажер предназначен для использования в учебном процессе: на самих занятиях, в качестве контрольной формы, а также для дипломного проектирования и самостоятельной работы. В рамках производства тренажер может использоваться для переподготовки кадров, повышения уровня квалификации или аттестации.

В дальнейшем планируется усовершенствование компьютерного тренажера путем добавления новых операций и способов 3D визуализации.

Список использованных источников

- [1] Electromagnetic forming – A review / V. Psyk, D. Risch, B. L. Kinsey, A. E. Tekkaya, M. Kleiner. – DOI 10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012 // Journal of Materials Processing Technology. – 2011. – Vol. 211, issue 5. – Pp. 787-829.
- [2] Glushchenkov, V. Achievements in magnetic pulse welding and assembly of tubular structures / V. Glushchenkov, V. Karpukhin, V. Pesotsky // Proceedings of The International Conference on the Joining of Materials: JOM-6. – Helsingor, Denmark: European Institute for the Joining of Materials, 1993. – Pp. 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. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22957781> (дата обращения: 29.07.2021). – Рез. англ.
- [4] Белый, И. В. Давление на тонкостенную заготовку при обработке ее импульсным магнитным полем / И. В. Белый, Г. В. Остроумов, С. М. Фертик // Вестник Национального технического университета «ХПИ». Магнитно-импульсная обработка металлов. – 1971. – № 1. – С. 3-15.
- [5] Расчет параметров магнитного молота / Г. М. Лебедев, Ю. М. Овчинников [и др.] // Вопросы производства летательных аппаратов: Труды Куйбышевского авиационного института. – 1970. – Вып. 41. – С. 18-22.
- [6] Черников, Д. Г. Исследование процесса магнитно-импульсной формовки с учетом эффекта просачивания магнитного поля сквозь заготовку / Д. Г. Черников, В. Ф. Карпукhin, В. А. Глушченков. – DOI 10.37313/1990-5378-2020-22-2-75-80 // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2020. – Т. 22, № 2(94). – С. 75-80.
- [7] Карпукhin, В. Ф. Определение параметров магнитно-импульсной формовки / В. Ф. Карпукhin // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2012. – № 5-1(36). – С. 228-232. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21078106> (дата обращения: 29.07.2021). – Рез. англ.
- [8] Belyaeva, I. A. Hybrid Static and Magnetic-Pulsed Loading in Sheet Stamping / I. A. Belyaeva, V. A. Glushchenkov. – DOI 10.3103/S1068798X20030077 // Russian Engineering Research. – 2020. – Vol. 40, No 3. – Pp. 214-217.
- [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.]. – DOI 10.18287/JBPE21.07.010305 // Journal of Biomedical Photonics and Engineering. – 2021. – Vol. 7, No. 1. – Article number: 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.]. – DOI 10.1134/S0006350919020088 // BIOPHYSICS. – 2019. – Vol. 64, issue 2. – Pp. 214-223.
- [11] Компьютерный тренажер для установки и снятия детали со станка ДИП-400 / Е. В. Ершов, Л. Н. Виноградова, С. В. Челнокова, А. С. Мартюгов. – DOI 10.23859/1994-0637-2019-1-88-2 // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2019. – № 1(88). – С. 20-26.
- [12] Орлов, А. А. Архитектура и принципы построения компьютерного тренажера разделительного производства / А. А. Орлов, С. Н. Тимченко, В. С. Сидоренко // Перспективные материалы. – 2013. – № S14. – С. 78-82. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20282240> (дата обращения: 29.07.2021).
- [13] Khaimovich, I. N. Automatisation of Calculation Method of Technological Parameters of Wiredrawing with Account of Speed Factor and Material Properties / I. N. Khaimovich, A. I. Khaimovich, E. A. Kovalkova. – DOI 10.4028/www.scientific.net/SSP.299.552 // Solid State Phenomena. – 2020. – Vol. 299. – Pp. 552-558.
- [14] Khaimovich, I. N. Improvement of Technological Process of Multiproduct Production on the Bases of Simulation Modeling of Production Unit / I. N. Khaimovich, M. A. Frolov. – DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.684.487 // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol. 684. – Pp. 487-507.
- [15] Khaimovich, I. N. Computer-Aided Engineering of the Process of Injection Molding Articles Made of Composite Materials / I. N. Khaimovich, A. I. Khaimovich. – DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.746.269 // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 746. – Pp. 269-274.
- [16] Khaimovich, I. N. CAD system of design and engineering provision of die forming of compressor blades for aircraft engines / I. N. Khaimovich. – DOI 10.1088/1755-1315/87/8/082024 // IOP Conference Series: Earth and



Environmental Science. – 2017. – Vol. 87, issue 8. – Article number: 082024.

- [17] Литвинов, В. Г. Автоматизированная информационная система расчета параметров процессов магнитно-импульсной обработки металлов / В. Г. Литвинов, Д. Г. Черников, А. К. Яшкова // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2017): труды Межд. научно-тех. конф. – Самара: СамНЦ РАН, 2017. – С. 368-372. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29194737> (дата обращения: 29.07.2021).
- [18] Теоретическое и экспериментальное обоснование обработки расплавов на основе алюминия импульсными магнитными полями / К. В. Никитин, Е. А. Амосов, В. И. Никитин [и др.]. – DOI 10.17073/0021-3438-2015-5-11-19 // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2015. – № 5. – С. 11-19. – Рез. англ.
- [19] Pandelidis, I. Optimization of injection molding design / I. Pandelidis, Q. Zou. – DOI 10.1002/pen.760301502 // Polymer Engineering & Science. – 1990. – Vol. 30, issue 15. – Pp. 873-882.
- [20] Batygin, Yu. V. Magnetic pulsed processing of metals for advanced technologies of modernity – a brief review / Yu. V. Batygin, E. A. Chaplygin, O. S. Sabokar. – DOI 10.20998/2074-272X.2016.5.05 // Electrical Engineering & Electromechanics. – 2016. – No 5. – Pp. 35-39.
- [21] Yin, Y. F. Modeling and Analysis of Process Parameters for Plastic Injection Molding of Base-Cover / Y. F. Yin. – DOI 10.4028/www.scientific.net/amr.602-604.1930 // Advanced Materials Research. – 2012. – Vol. 602-604. – Pp. 1930-1933.
- [22] Fetecau, C. Numerical and Experimental Study on the Injection Moulding of a Thin-Wall Complex Part / C. Fetecau, I. Postolache, F. Stan. – DOI 10.1115/MSEC_ICMP2008-72196 // 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. – ASME, Evanston, Illinois, USA, 2008. – Pp. 85-93.
- [23] Min, B. H. A study on quality monitoring of injection-molded parts / B. H. Min. – DOI 10.1016/S0924-0136(02)00445-4 // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 136, issue 1-3. – Pp. 1-6.
- [24] Monitoring and dynamic control of quality stability for injection molding process / X. Zhou [и др.]. – DOI 10.1016/j.jmatprotec.2017.05.038 // Journal of Materials Processing Technology. – 2017. – Vol. 249. – Pp. 358-366.
- [25] Joining of Copper to Brass Using Magnetic Pulse Welding / T. Vaaten [и др.]. – DOI 10.17877/DE290R-8664 // Proceedings of the 4th International Conference on High Speed Forming – ICHSF 2010. – Columbus, Ohio, USA, 2010. – Pp. 84-96.

Поступила 29.07.2021; одобрена после рецензирования 25.08.2021; принята к публикации 07.09.2021.

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>**, azykova777@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

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. (In Eng.) DOI: <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*. European Institute for the Joining of Materials, Helsingor, Denmark; 1993. p. 473-484. (In Eng.)
- [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. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22957781> (accessed 29.07.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [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] Lebedev G.M., Ovchinnikov Yu.M., et al. *Raschet parametrov magnitnogo molota* [Calculation of the parameters of the magnetic hammer]. *Voprosy proizvodstva letatel'nykh apparatov: Trudy Kujbyshevskogo aviacionnogo instituta*. 1970; (41):18-22. (In Russ.)
- [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.) DOI: <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. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21078106> (accessed 29.07.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [8] Belyaeva I.A., Glushchenkov V.A. Hybrid Static and Magnetic-Pulsed Loading in Sheet Stamping. *Russian Engineering*



- Research. 2020; 40(3):214-217. (In Eng.) DOI: <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. (In Eng.) DOI: <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. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S0006350919020088>
- [11] 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.) DOI: <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2019-1-88-2>
- [12] 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. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20282240> (accessed 29.07.2021). (In Russ.)
- [13] Khaimovich I.N., Khaimovich A.I., Kovalkova E.A. Automatisatation of Calculation Method of Technological Parameters of Wiredrawing with Account of Speed Factor and Material Properties. *Solid State Phenomena*. 2020; 299:552-558. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.299.552>
- [14] 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. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.684.487>
- [15] 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. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.746.269>
- [16] 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. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/87/8/082024>
- [17] Litvinov V., Chernikov D., Yashkova A. *Avtomatizirovannaya informacionnaya sistema rascheta parametrov processov magnitno-impul'snoj obrabotki metallov* [Automated information system for calculating the parameters of the processes of magnetic-pulse metal processing]. *Proceedings of the International Scientific Conference on Advanced Information Technologies and Scientific Computing (PIT 2017)*. Samara Scientific Center of RAS, Samara; 2017. p. 368-372. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29194737> (accessed 29.07.2021). (In Russ.)
- [18] 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.) DOI: <https://dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2015-5-11-19>
- [19] Pandelidis I., Zou Q. Optimization of injection molding design. *Polymer Engineering & Science*. 1990; 30(15):873-882. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1002/pen.760301502>
- [20] 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. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2016.5.05>
- [21] Yin Y.F. Modeling and Analysis of Process Parameters for Plastic Injection Molding of Base-Cover. *Advanced Materials Research*. 2012; (602-604):1930-1933. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.602-604.1930>
- [22] 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. ASME, Evanston, Illinois, USA; 2008. p. 85-93. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1115/MSEC_ICMP2008-72196
- [23] Min B.H. A study on quality monitoring of injection-molded parts. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003; 136(1-3):1-6. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00445-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00445-4)
- [24] 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. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.05.038>
- [25] Baaten T., Debroux N., De Waele W., Faes K. Joining of Copper to Brass Using Magnetic Pulse Welding. *Proceedings of the 4th International Conference on High Speed Forming – ICHSF 2010*. Columbus, Ohio, USA; 2010. p. 84-96. (In Eng.) DOI: <http://dx.doi.org/10.17877/DE290R-8664>

Submitted 29.07.2021; approved after reviewing 25.08.2021;
accepted for publication 07.09.2021.

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

All authors have read and approved the final manuscript.

