Том 28, №1, 2022

# Материаловедение. Энергетика

Санкт-Петербург

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. ЭНЕРГЕТИКА**
**MATERIALS SCIENCE. POWER ENGINEERING**
*(ранее "Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки")*

**РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА**

*Васильев Ю.С.,* главный редактор, научный руководитель СПбПУ, академик РАН

*Александров М.Л.,* член-корр. РАН

*Згуровский М.З.,* ин. член РАН, академик НАН Украины

*Клименко А.В.,* академик РАН

*Костюк В.В.,* академик РАН

*Лагарьков А.Н.,* академик РАН

*Окрепилов В.В.,* академик РАН

*Рудской А.И.,* академик РАН

*Саркисов А.А.*, академик РАН

*Федоров М.П.,* академик РАН

**EDITORIAL COUNCIL**

*Vasiliev Yu.S.* — head of the editorial council, full member of the Russian Academy of Sciences, Scientific director of the Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

*Aleksandrov M.L.* — corresponding member of the Russian Academy of Sciences

*Zgurovskiy M.Z.* — foreign member of the Russian Academy of Sciences, full member of the National Academy of Sciences of Ukraine

*Klimenko A.V.* — full member of the Russian Academy of Sciences

*Kostiuk V.V.* — full member of the Russian Academy of Sciences

*Lagar'kov A.N.* — full member of the Russian Academy of Sciences

*Okrepilov V.A.* — full member of the Russian Academy of Sciences

*Rudskoy A.I.* — full member of the Russian Academy of Sciences

*Sarkisov A.A.* — full member of the Russian Academy of Sciences

*Fedorov M.P.* — full member of the Russian Academy of Sciences

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА**

*Васильев Ю.С.,* главный редактор, научный руководитель СПбПУ, академик РАН

*Кондратьев С.Ю.,* зам. главного редактора, д-р техн. наук, профессор СПбПУ

*Аксёнов Л.Б.,* д-р техн. наук, профессор СПбПУ

*Башкарёв А.Я.,* д-р техн. наук, профессор СПбПУ

*Боровков А.И.*, к.т.н., проректор по цифровой трансформации СПбПУ

*Гордеев С.К.,* д-р техн. наук, ст. научн. сотр. ЦНИИМ

*Забоин В.Н.,* д-р техн. наук, профессор СПбПУ

*Каляев И.А.,* д-р техн. наук, академик РАН

*Колсун Михал,* профессор Технического университета г. Кошице (Словакия)

*Коровкин Н.В.,* д-р техн. наук, профессор СПбПУ

*Митяков А.В.,* д-р техн. наук, профессор СПбПУ

*Михайлов В.Г.,* д-р техн. наук, профессор Бранденбургского ТУ (Германия)

*Райчик Ярослав,* д-р техн. наук, профессор Ченстоховского политехнического университета (Польша)

*Рамасуббу С.,* PhD, Директор по исследованиям BISS, ITW-India (P) Ltd (Индия)

*Сергеев В.В.,* д-р техн. наук, профессор, чл-корр РАН, первый проректор СПбПУ

*Тендлер М.Б.,* ин. член РАН, KTH Royal Institute of Technology (Швеция)

*Титков В.В.,* д-р техн. наук, профессор СПбПУ

*Толочко О.В.,* д-р техн. наук, профессор СПбПУ

*Фокин Г.А.,* д-р техн. наук, генеральный директор ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург»

*Цеменко В.Н.,* д-р техн. наук, зав. каф. СПбПУ

**EDITORIAL BOARD**

*Vasiliev Yu.S.* — editor-in-chief, full member of the Russian Academy of Sciences, Scientific director of the Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

*Kondrat'ev S.Yu.* — deputy editor-in-chief, Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU

*Aksenov L.B.* — Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU

*Bashkarev A.Ya.* — Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU

*Borovkov A.I.* — PhD in Technical Sciences, Vice Rector for Digital Transformation

*Gordeev S.K.* — Doctor of Technical Sciences, prof. CNIIM

*Zaboin B.N.* — Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU

*Kayaev I.A.* — full member of the Russian Academy of Sciences

*Kolcun Michal* — Ph.D., Technical University of Kosice (Slovak Republlc)

*Korovkin N.V.* — Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU

*Mityakov A.V.* — Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU

*Michailov V.G.* — Doctor of Technical Sciences, prof. BTU (Germania)

*Raychik Ya.* — Doctor of Technical Sciences, prof. Czestochova Polytecnic University (Poland)

*Ramasubbu S.* — PhD, Lifetime Fellow, Indian Academy of Science, Research Director BISS, ITW-India (P) Ltd (India)

*Sergeev V.V.* — Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU, corresponding member of the RAS

*Tendler M.B.* — foreign member of the Russian Academy of Sciences, KTH Royal Institute of Technology (Sweden)

*Titkov V.V.* — Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU

*Tolochko O.V.* — Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU

*Fokin G.A.* — Doctor of Technical Sciences, General Director of LLC «Gazprom Transgaz St. Petersburg»

*Tsemenko V.N.* — Doctor of Technical Sciences, Head of Chair SPbPU

Журнал «Материаловедение. Энергетика» (ранее «Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки») с 1995 года издается под научно-методическим руководством Российской академии наук.

Журнал с 2002 года входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Сведения о публикациях представлены в Реферативном журнале ВИНИТИ РАН, в международной справочной системе «Ulrich`s Periodical Directory», в базах данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), Google Scholar, EBSCO, ProQuest, ROAD, Index Copernicus, CNKI, RSCI (WoS).

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (свидетельство ЭЛ № ФС 77-78004 от 27.03.2020 г.)

С 2005 года журнал включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), размещенную на платформе Научной электронной библиотеки на сайте http://www.elibrary.ru

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

Адрес редакции и издательства: Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
Тел. редакции (812) 294-22-86.

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2022

# Содержание

## Энергетика. Электротехника

**Маннанов Э.Р., Галунин С.А.** Разработка индукторов для нагрева дисков..... 5

## Металлургия и материаловедение

**Васильева Е.Д., Васильева А.А., Кычкин А.К.** К вопросу о методах исследования воздействия влаги на полимерные композиционные материалы..... 21

**Боуамама М., Елмеиче А., Белхаджи Б., Боуленоуар М. Ел Н.** Техническое обслуживание буровых станков с использованием метода парето ABC..... 32

**Соколов Ю.А.** Автоматизированная производственная система аргонодуговой сварки в контролируемой атмосфере..... 43

**Стрижиус В.Е.** Сравнение характеристик усталостной прочности угленанокомпозита ВКУ-18тр и углепластика КМУ-4-2м-3692..... 67

# Contents

## Energetics. Electrical engineering

**Mannanov E.R., Galunin S.A.** Designing inductuction coils for disks heating..... 5

## Metallurgy and Materials

**Vasilyeva E.D., Vasilyeva A.A., Kychkin A.A.** On the methods of studying the impact of moisture on polymeric composite materials..... 21

**Bouamama M., Elmeiche A., Belhadj B., Boulenouar M. El H.** Maintenance of drilling machines using pareto ABC method..... 32

**Sokolov Y.A.** Automated production system of argon arc welding in a controlled atmosphere..... 43

**Strizhius V.E.** Comparison of fatigue strength characteristics of VKU-18tr carbon nanocomposite and KMU-4-2m-3692 carbon fiber composite..... 67

# Энергетика. Электротехника
# Energetics. Electrical engineering

Научная статья
УДК 537.856
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.28101

*Э.Р. Маннанов*[1] ✉ , *С.А. Галунин*[2]

[1] АО «Силовые машины», Санкт-Петербург, Россия;

[2] Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ emil-mannanov@mail.ru

## РАЗРАБОТКА ИНДУКТОРОВ ДЛЯ НАГРЕВА ДИСКОВ

*Аннотация.* В рамках исследования выполняется поиск универсальной конструкции индуктора для обеспечения возможности проведения процесса локальной термообработки дисков простого и сложного профиля, в частности, для наиболее востребованного ряда типоразмеров демпферных пружин грузовых автомобилей. Получены новые данные исследований различных типоразмеров металлических дисков. Выявлено влияние геометрических, электрических и позиционных параметров на температурное распределение по рассматриваемому изделию при его электромагнитной термообработке, в частности, исследованы зависимости температуры от габаритных размеров нагреваемого объекта, количества и длин пальцев демпферной пружины, влияние зоны отгиба пальцев на конечный температурный профиль. Результаты проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ направлены на сокращение проектных затрат при изготовлении индукторов под каждый типоразмер демпферных пружин грузовых автомобилей и на повышение эффективности процесса нагрева за счет контроля режима работы.

*Ключевые слова:* индукционный нагрев, численное моделирование, индуктор, термообработка, конечно-элементный метод, демпферная пружина.

*Для цитирования:*

Маннанов Э.Р., Галунин С.А. Разработка индукторов для нагрева дисков // Материаловедение. Энергетика. 2022. Т. 28, № 1. С. 5–20. DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.28101

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Маннанов Э.Р., Галунин С.А., 2022. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Scientific article
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.28101

*E.R. Mannanov*[1] ✉ , *S.A. Galunin*[2]

[1] JSC “Power machines”, St. Petersburg, Russia;
[2] St. Petersburg Electrotechnical University "LETI",
St. Petersburg, Russia

✉ emil-mannanov@mail.ru

# DESIGNING INDUCTION COILS FOR DISKS HEATING

*Abstract*. In this study, the authors search for the universal inductor design to provide uniform local heat treatment of simple and complex profile disks, in particular, for the most demanded standard siz-es of truck diaphragm springs. New research data have been obtained for various sizes of metal disks. The influence of geometric, electrical and positional parameters on the temperature distri-bution of the product under consideration during its electromagnetic heat treatment was re-vealed. The dependence of temperature on the dimensions of the heated object, the number and length of the fingers of the diaphragm spring, the influence of the finger bend zone on the final temperature profile were studied too. The results of the research and development work are aimed at reducing design costs for the manufacture of inductors for each standard size of truck diaphragm springs and at increasing the efficiency of the heating process by controlling the oper-ating mode.

*Keywords:* induction heating, numerical simulation, induction coil, heat treatment, finite element method, diaphragm spring.

*Citation:*

E.R. Mannanov, S.A. Galunin, Designing induction coils for disks heating, Materials Science. Power Engineering, 28 (01) (2022) 5–20, DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.28101

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

**Введение.** Разработанные теоретические основы индукционного нагрева и аналитические, математические и численные методы расчета и анализа позволили решить большой объем задач проектирования индукционных установок. Значительный вклад в развитие индукционных систем были сделаны такими учеными, как Вологдин В.П., Слухоцкий А.Е., Немков В.С., Царевский В.В., Зимин Л.С., Рапопорт Э.Я., Шепеляковский К.З., Дзлиев С.В., Лопух Д.Б., Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В., Никаноров А.Н., Донской А.В., Васильев А.С., Бодажков В.А., А.В. Лыков, А.М., Самарский А.А., и др. [1–5].

Индукционный нагрев может быть применен на всех закалённых узлах и деталях. Частным примером является индукционный нагрев диска демпферных пружин грузовых автомобилей под отпуск. Демпферная пружина имеет конкретное количество пальцев, которые выполняют роль рычагов выключения сцепления. Упругие свойства пальцев непосредственно влияют на плавность включения сцепления, а изменением формы прорезей можно регулировать жесткость демпферной пружины. При индукционной термообработке важно принимать во внимание назначение и режим нагрева, область термообработки и геометрические параметры обрабатываемого изделия, а также технологию изготовления обрабатываемого конструктивного элемента. Диапазон габаритных размеров демпферных пружин для располагается от 268 до 430 мм и каждый уникальный диск со сложным профилем – демпферной пружины требует индивидуального проектирования конструкции нагревателя и настройки режима термообработки (входные пара-

© E.R. Mannanov, S.A. Galunin, 2022. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

метры – уровень подводимой мощности, частоты, позиционирование индуктора и изделия, геометрические параметры; выходные параметры – уровень максимальных и усредненных температурных распределений в заданной области нагрева, оценка перепада температур по сечению и вдоль радиуса термообрабатываемого изделия сложного профиля).

Индукционные системы имеют широкое применение, однако в рамках данной работы выполняется периодический режим нагрева под отпуск стального диска со сложным профилем – демпферной пружины, температура нагрева 450°С, рабочая частота от 1 до 10 кГц.

Стандартные требования, предъявляемые к нагревательному оборудованию, в частности, к установкам индукционного нагрева следует отнести стремление обеспечить надежность конструкции, заданный температурный уровень, высокую производительность, высокие энергетические характеристики при минимальных эксплуатационных затратах и оптимизировать систему электропитания и управления. Критериями оценки эффективности используемых индукционных систем служит комплексная работа таких показателей, как достижение равного температурного распределения по радиусу и/или сечению (локально или по всему объему) за минимальное время нагрева при исключении перегревов.

Рапопорт Э.Я., Кувалдин А.Б., Лепешкин С.А. и другие ученые рассматривали вопросы нагрева вращающихся дисков индукционным методом. Как в теории, так и в практике, важное значение имеют краевые эффекты. Ранние работы были сделаны с применением аналитических методов, а более современные уже представляли численные решения.

Нагрев заготовок, обладающих вращательной симметрией широко применяется в различных промышленных технологиях и требует повышенного внимания при проектировании индукторов. Для дисков обычно используется спиральный, кольцевой или петлевой индуктор.

При помещении диска в высокочастотное электромагнитное поле, в диске индуцируются вихревые токи (токи Фуко), под воздействием протекания которых материал диска нагревается. Проникающее в заготовку переменное электромагнитное поле затухает с глубиной. Существенная часть электромагнитной энергии переходит в тепловую. Данное физическое явление называется поверхностным эффектом. Выраженность эффекта повышается с ростом частоты, поэтому нагрев внутренних слоев обеспечивается за счет теплопроводности термообрабатываемого изделия.

В большинстве случаев, при нагреве требуется получить равномерное распределение температуры по всему объему объекта или обеспечить локальное равномерное распределение поле. Температурное распределение в диске необходимое для технологического процесса, главным образом требуется в установившемся режиме, когда устойчивое во времени температурное поле является результатом баланса между источниками тепла и тепловыми потерями с поверхности диска.

Принципиальным значением обладает движение нагревателя или нагреваемого объекта. Широкое распространение имеет внедрение поступательного движения, как в случае нагрева лент, слябов и др. В частности, применяется вращение изделий, которые обладают вращательной симметрией. В таком случае вихревой ток в диске также будет обладать вращательной симметрией.

В связи с постоянным развитием науки и техники, для сокращение проектных затрат при изготовлении индукторов актуальным является определение эффективной концепции индукционного нагрева и исследование электротепловых процессов, поиск универсальной конструкции индуктора для обеспечения возможности проведения процесса локальной термообработки дисков простого и сложного профиля, в частности, для наиболее востребованного ряда типоразмеров демпферных пружин грузовых автомобилей.

Цель данной работы заключается в разработке универсальной конструкции индуктора для локального равномерного нагрева широкого диапазона типоразмеров дисков демпферных пружин.

**Математическая модель решения сопряженных задач**

Математическая модель решения связанной электротепловой задачи лежит в основе построения численных моделей при проектировании индукционных систем. В целом, разработка численной модели заключается в преобразовании инженерного описания проблемы в четкую математическую постановку. В работах [6–11] предложены методики моделирования сопряженной задачи и способы реализации процедур вычисления для достижения целевых функций.

Алгоритм, представленный на рис. 1, демонстрирует совместное электротепловое решение задачи с учетом нелинейных свойств.

Процессы, протекающие в металлах при работе индукционной установки, описываются системой уравнений электромагнетизма и теплопроводности с нелинейными коэффициентами. В свою очередь, нелинейные коэффициенты связаны с зависимостью свойств металлических изделий от температуры и напряженности электромагнитного поля, чем собственно и обусловлена связь электромагнитной и тепловой задачи.

Температурное поле определяет величину удельного сопротивления и величину магнитной проницаемости каждого элемента дискретизации. В блоке поиска промежуточных значений величин, по имеющемуся дискретному набору известных значений формируется массив с данными о распределении внутренних источников теплоты, полученного после решения электромагнитной задачи. Полученный набор данных используется в качестве нагрузки в тепловой задаче. При равенстве элементов дискретизации в обеих задачах, соблюдается равенство массивов их внутренних источников теплоты. Далее находится температурное распределение на следующем временном участке, определяемом шагом по времени. При неудовлетворении критериев окончания расчетов выполняется цикличный переход к пункту 1.

Важную роль играет величина шага и заданная точность расчета, поскольку данные параметры должны быть согласованы, в частности, в соответствии с построенной сеткой численной модели. Задача требует итерационной адаптации и грамотного описания целевой функции.

Применительно к задаче нагрева в исследовании [7–11], целевая функция рассчитывается по формуле (1) и интерпретируется, как отклонение распределения температуры к заданному уровню 450°С в процентах.

$$f_{\text{опт}} = \min\left(\max\left[T - T_{\max}\right]\right). \quad (1)$$

Также может быть включен модуль оптимизации, как в каждый блок расчета, так и в конкретном блоке. Достижению целевой функции может поспособствовать группирование переменных и использование взаимосвязанных или независимых контуров оптимизации для каждой из нижеперечисленных групп переменных: конструктивные, описывающие геометрические размеры индуктора; позиционные, определяющие положение индуктора, заготовки и других объектов системы; электрические, определяющие величину тока в индукторе и частоту; временные, определяющие продолжительность термобработки и охлаждения, скорость перемещения индуктора / заготовки.

***Исследования индукционных систем для нагрева дисков простого и сложного профиля***

В работах [6–11] представлены разработанные автором численные 2D и 3D модели, написанные на параметрическом языке программирования на базе пакета ANSYS Mechanical APDL (ANSYS Parametric Design Language) и результаты исследований различных индукционных конфигураций систем для локального нагрева дисков и демпферных пружин индукционным методом.

Создание численных параметрических моделей было обусловлено необходимостью разработки универсальной конструкции индукционного нагревателя способного обеспечить нагрев широкого диапазона типоразмеров демпферных пружин, металлических заготовок в форме дисков и колец и других осесимметричных металлических изделий.

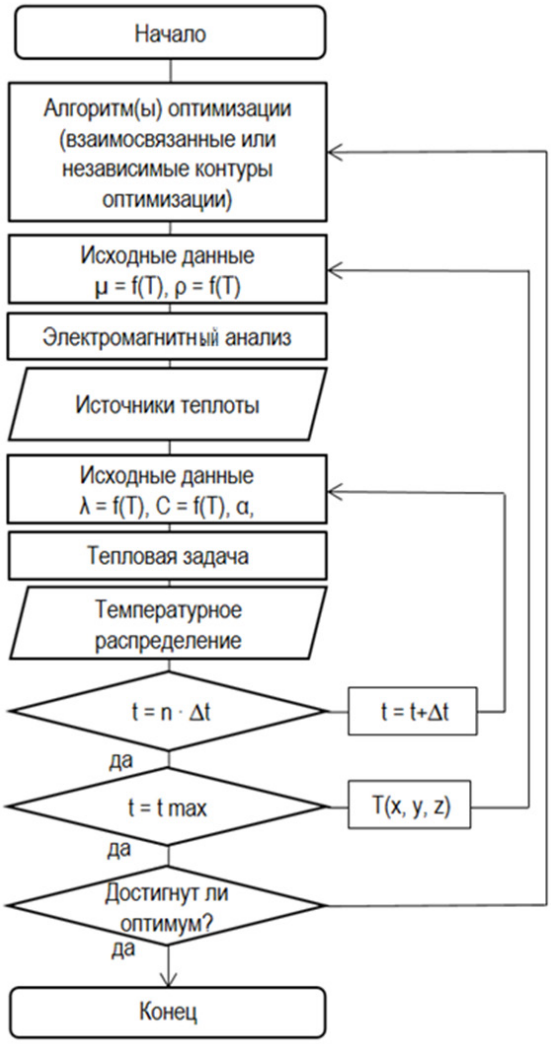


Рис. 1. Алгоритм численного решения связанной электротепловой задачи
Fig. 1. Numerical solution algorithm of a coupled electrothermal problem

В электромагнитной задаче выполняется гармонический анализ. Тип теплового анализа – переходный. В задачах заданы граничные условия III рода, которые характеризуются законом конвективного теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой.

С целью упрощения расчетов принято допущение, что нагреваемый диск имеет простой и плоский профиль, а индуктор имеет спиральную форму. Эскиз исследуемой системы представлен на рис. 2, геометрия параметризованной численной модели в 2D постановке представлена на рис. 3.

Параметры оптимизации – ширина витков и толщина стенок медного водоохлаждаемого индуктора, величина воздушного зазора, полюсный шаг витков, рабочая частота тока, действующее значение тока, время нагрева, диаметр и толщина объекта нагрева, электротепловые нелинейные свойства диска.

В качестве рабочей частоты тока установлено 2,5 кГц. Данное значение представляет собой нижнюю границу оптимальных частот. Предполагается наличие сложного профиля образца, поэтому использование частот свыше выбранной может повлечь за собой возникновение горячих точек.

Проанализировав результаты моделирования, следует отметить, что наблюдается, нагрев в зоне под индуктором, а максимальные значения температуры зависят преимущественно от поданной нагрузки, величины воздушного зазора и концепции нагрева. Один из численных резуль-

Рис. 2. Эскиз системы: 1 – диск; 2 – индуктор
Fig. 2. System sketch: 1 – disk; 2 – inductor

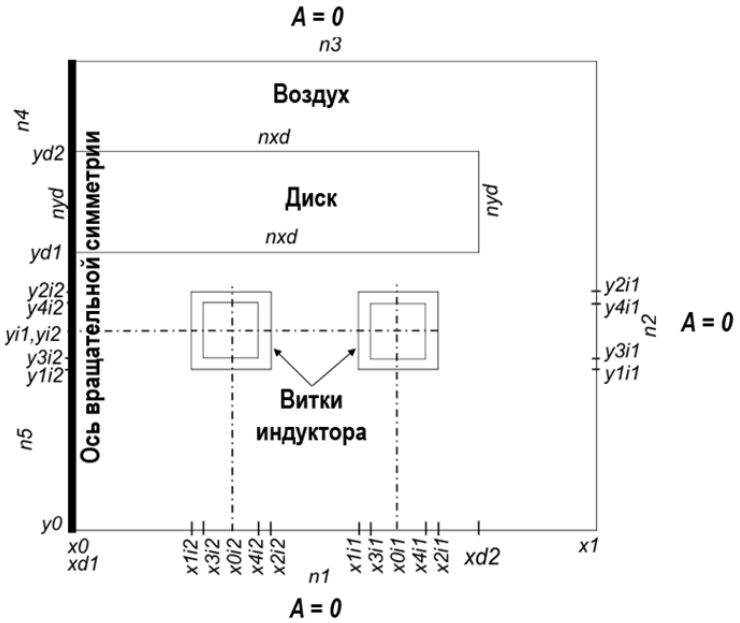


Рис. 3. Геометрия численной системы в 2D постановке
Fig. 3. Geometry numerical systems in 2D

татов расчетов представлен на рис. 4, на котором проиллюстрировано ¾ диска для отражения распределения температуры по поверхности и сечению объекта нагрева.

В исследовании [7–11] была разработана расчетная методика моделирования индукционной системы для нагрева диска простого и сложного профиля в 3D постановке. Моделирование геометрии имеет общую черту, связанную с возможностью использования симметрии системы. Вместо того, чтобы моделировать диск целиком, для расчета принята только одиночная секция, используя при этом азимутальную периодичность структуры изделия.

В результате параметрических исследований, получено равномерное распределение температуры в заданной области в диапазоне целевого уровня температур для заготовок диаметром 268 – 420 мм, что соответствует поставленной задаче (рис. 6). На нижеследующем рис. 7 приве-

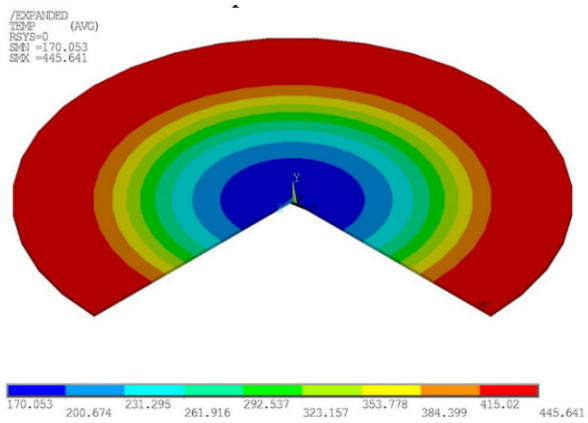


Рис. 4. Температурное распределение в диске

Fig. 4. Temperature distribution in the disk

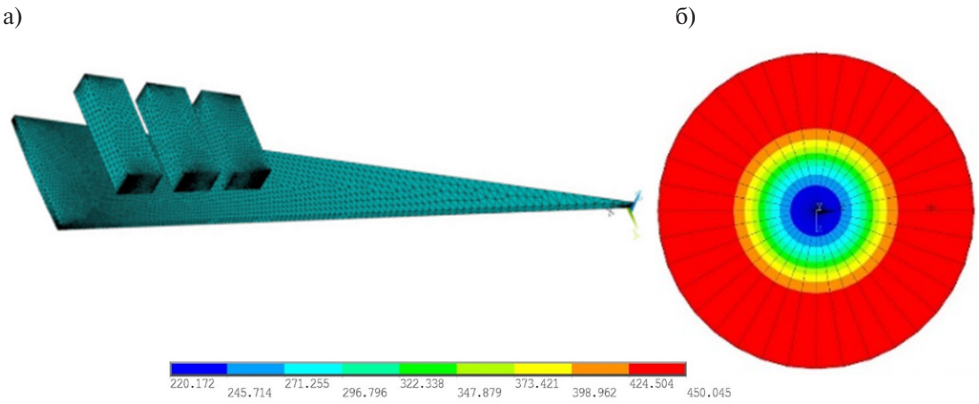


Рис. 5. а) конечно-элементная 3D система “Индуктор – диск”. Область моделирования 90;
б) температурное распределение на поверхности диска

Fig. 5. a) finite element 3D system "Inductor – disk". Modeling area 90;
b) temperature distribution on the disk surface

дено семейство зависимостей, демонстрирующее изменение полного КПД индуктора при вариации воздушного зазора и рабочей частоты.

Аналогичная постановка задачи применена и для демпферной пружины, которая имеет сложную форму. Данное решение позволяет регулировать количество пальцев демпферной пружины и сократить время, необходимое на расчеты. Основные геометрические размеры демпферной пружины показаны на рис. 8. На рис. 9 показано схематическое представление постановки задачи в модели, на рис. 10 конечно-элементная 3D – система, а результаты параметрических расчетов представлены на рис. 11.

Известно, что упругие свойства пальцев влияют на плавность включения сцепления, а изменением формы прорезей и количества пальцев можно регулировать жесткость демпферной пружины. Данное исследование учитывало габаритные размеры демпферной пружины, количество и форму пальцев, нагрев в продольном или поперечном (встречное включение токов в витках индуктора) высокочастотном магнитном поле. Исходные данные моделирования демпферной пружины следующие: количество пальцев 12, 18, 20, 24; соответствующие области моделирования, град(мин) 15(0), 10(0), 9(0), 7(30).

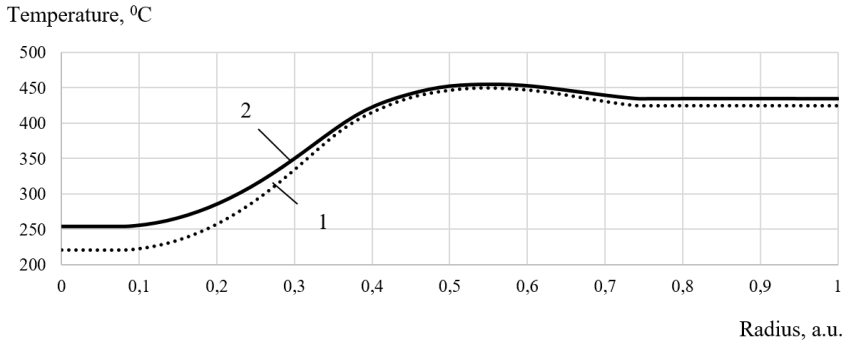


Рис. 6. Температурный профиль на поверхности заготовки вдоль радиуса при нагреве диска:
1 – четырех витковый индуктор и заготовка 350 мм; 2 – пяти витковый индуктор и заготовка 420 мм

Fig. 6. Temperature profiles on workpiece surface along the radius with heated disk:
1 – four-turn inductor and workpiece 350 mm; 2 – five-turn inductor and workpiece 420 mm

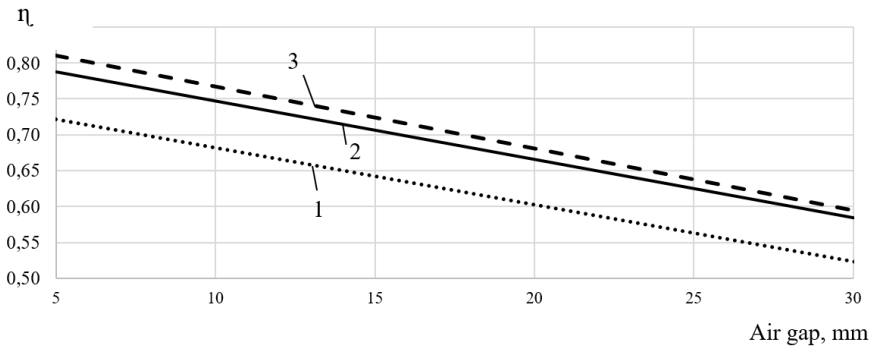


Рис. 7. Влияние воздушного зазора на полный КПД индуктора при различных рабочих частотах тока:
1 – 1 кГц; 2 – 2,5 кГц; 3 – 8 кГц

Fig. 7. Air gap influence on the total inductor efficiency at different operating current frequencies:
1 – 1 kHz; 2 – 2.5 kHz; 3 – 8 kHz

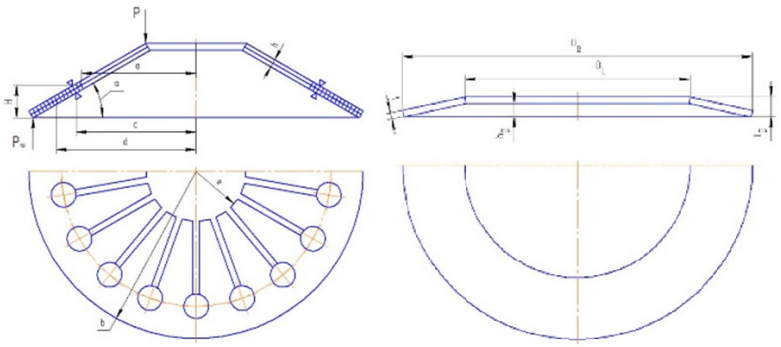

Рис. 8. Основные геометрические размеры демпферной пружины: $D_e$ – внешний диаметр, мм; $D_i$ – внутренний диаметр, мм; t – толщина пружины, мм; $h_0$ – высота ненагруженной пружины, мм;
$l_0 = h_0 + t$, где $l_0$ – общая высота ненагруженной пружины, мм; F – сила сжатия пружины, N;
S – смещение, мм; $D_f = D_i \cdot (2 \cdot S \cdot \mathrm{Sin}\beta)$, мм; $D_f$ – фактический внутренний диаметр, мм

Fig. 8. Basic geometrical dimensions of the damper spring: $D_e$ – outer diameter, mm; $D_i$ – inner diameter, mm;
t is the thickness of the spring, mm; $h_0$ is the height of the unloaded spring, mm; $l_0 = h_0 + t$,
where $l_0$ is the total height of the unloaded spring, mm; F is the compression force of the spring, N;
S – displacement, mm; $D_f = D_i \cdot (2 \cdot S \cdot \mathrm{Sin}\beta)$, mm; Df - actual inner diameter, mm

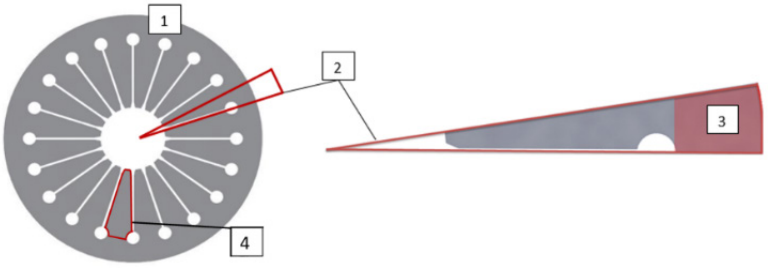


Рис. 9. Схематическое представление постановки задачи: 1 – общий вид изделия; 2 – область моделирования; 3 – зона нагрева; 4 – палец демпферной пружины

Fig. 9. Schematic problem statement: general view of workpiece 1; simulation zone 2; heating zone 3; finger 4 of diaphragm spring

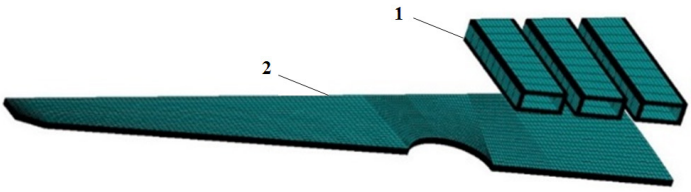


Рис. 10. Конечно-элементная 3D система: 1 – индуктор; 2 –демпферная пружина

Fig. 10. Finite-element 3D system: induction coil 1, diaphragm spring 2

По результатам расчетов получено равномерное распределение температуры в заданной области в диапазоне целевого уровня. При максимальном внешнем диаметре демпферной пружины 420 мм, толщине диска 3 мм, частоте нагревающего электромагнитного поля в 2,5 кГц, при воздушном зазоре равном 10 мм требуется 44 кВт, чтобы обеспечить высокоэффективный локальный равномерный нагрев до требуемого температурного уровня; при уменьшении диаметра до 268 мм, достаточно мощности в 15 кВт. В частности, получены температурные поля при вариации количества и длины пальцев демпферной пружины, при регулировании зоны отгиба пальцев с настройкой режима нагрева. Установлены основные связи конечных температурных распределений с геометрией нагреваемого изделия. Нагрев осуществлен с использованием как продольного, так и поперечного магнитных полей [7–11].

В исследовании [6, 7] была разработана расчетная методика моделирования индукционной системы для нагрева диска простого профиля вращением в высокочастотном магнитном поле в 3D постановке. Предлагаемая концепция нагрева дисков заключается в обеспечении локального нагрева вращением в высокочастотным продольном магнитном поле (см. рис. 12). Угловая скорость (Гц, об / сек) описана в глобальной декартовой системе координат заданием постоянных: OMEGAX, OMEGAY, OMEGAZ.

Модели способны дать возможность количественно оценить не только распределение температуры, но и пространственные и временные градиенты температуры в процессе нагрева. Эти данные могут быть использованы для расчета внутренних напряжений и деформаций в диске, а также для технологической оценки режима нагрева.

***Разработка конструкций индукторов и апробация результатов компьютерных исследований***

Конструкции индукторов разрабатываются с учетом физического явления – поверхностного эффекта, на котором основан принцип индукционного нагрева. Поверхностный эффект проявляется как в нагреваемом теле, так и в индуктирующем проводе, в силу вытеснения высокоча-

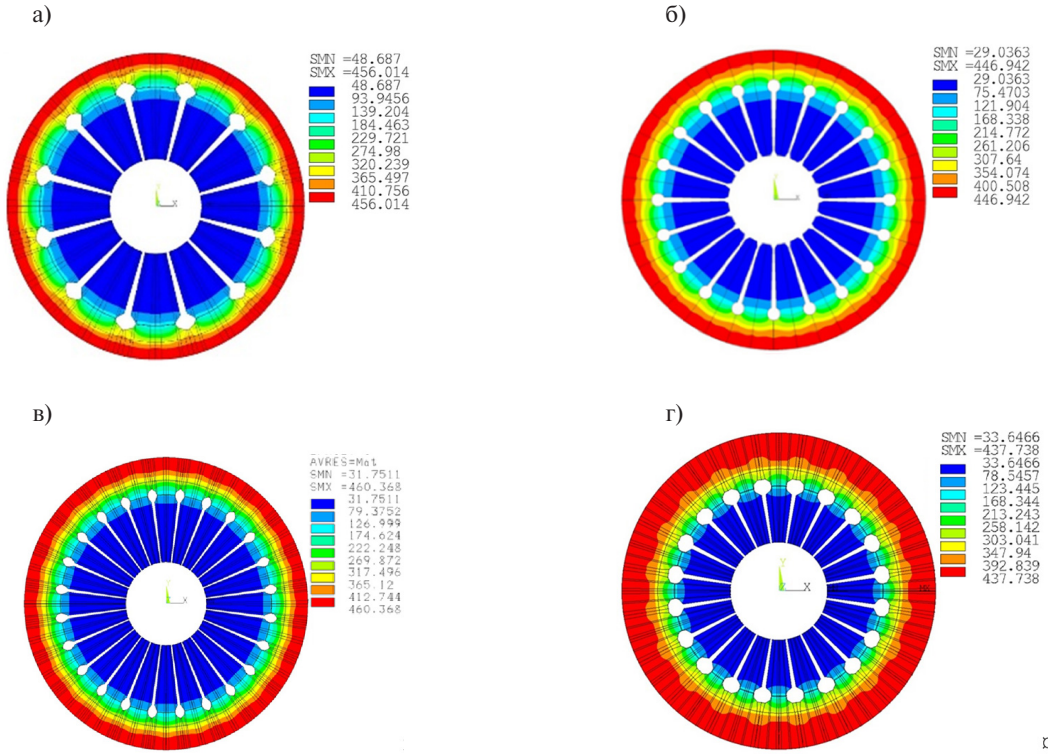


Рис. 11. Конечное температурное распределение при нагреве в продольном а), б), в) или поперечном г) высокочастотном магнитном поле. Количество пальцев: а) 12; б) 20; в) 24; г) 20

Fig. 11. The final temperature distribution after heating in a longitudinal a), b), c) or transverse d) high-frequency magnetic field. Number of fingers: a) 12; b) 20; c) 24; d) 20

стотного тока к поверхности. Поскольку рассматриваемая система имеет более одного нагревательного провода, логичным является ожидать неоднородность распределения плотности тока по поверхности нагревателей в результате физического явления называемым эффектом близости, который в свою очередь является одной из форм поверхностного эффекта.

Следует отметить, что в предлагаемом техническом решении, заготовка вращается с постоянной угловой скоростью. Проведение термообработки обеспечивается за счет того, что на область заготовки, находящейся внутри индуктора, наводятся вихревые токи, что инициирует генерацию источников теплоты. При повороте, на следующем участке диска, оказавшемся в индукторе, происходят аналогичные процессы. Процесс нагрева является непрерывным, поэтому предполагается, что распределение температуры будет постепенно становиться симметричным за счет вращения заготовки. Важную роль играет центрирование заготовки относительно индуктора.

Естественная конструкция индукционной системы для нагрева плоских изделий из ферромагнитной стали предполагает также наличие магнитопровода, однако для нагрева дисков, в частности, имеющих сложный профиль данное решение является не логичным. Перегрев диска является недопустимым, поскольку результатом будет чрезмерное разупрочнение, как в случае отпуска. Магнитопровод же, концентрирует области протекания вихревых токов, тем самым, сужая поля распределения источников теплоты. При нагреве диска со сложным профилем, характер распределения температуры будет значительно отличаться от системы, не включающей в себя магнитопровод. Прогнозирование распределения температуры в объеме диска также будет упрощено.

Разработанная конструкция индуктора представлена на рис. 13 а), в). Толщина стенок водоохлаждаемой медной трубки прямоугольного сечения составляет 1 мм.

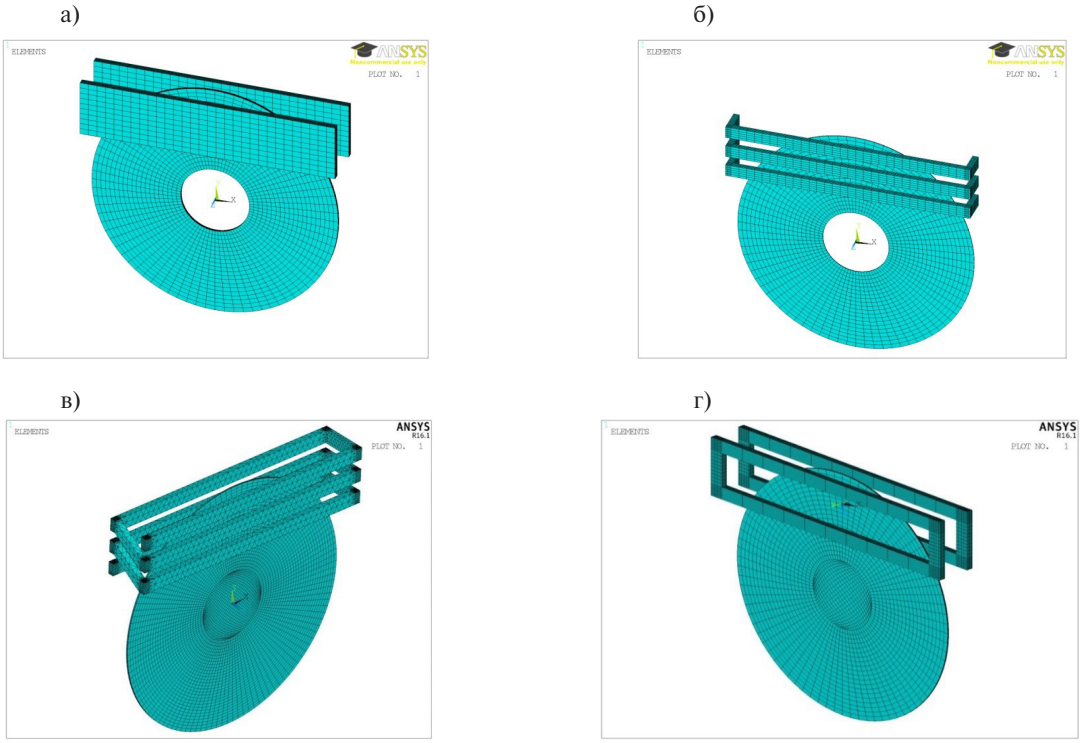


Рис. 12. 3D-модели индукционной системы нагрева в продольном (а, б, в) и попе-речном (г) магнитных полях

Fig. 12. Induction heating system 3D models in longitudinal (a, b, c) and transverse (d) magnetic fields

Как известно, индукционные системы нагрева в поперечном магнит-ном поле (ПМП) достаточно эффективны в целях получения заданных равномерных температурных полей.

Наиболее близкой по характеру протекающих процессов к реальным конструкциям нагревателей является индукционная система, состоящая из нагреваемого диска и двух индукторов, к примеру, выполненных в виде прямоугольных рамок с током конечной длины и ширины. В целях исследования разработана конструкция индуктора для нагрева изделия вращением в ПМП (рис. 13 б), г)). Лабораторный стенд индукционной системы нагрева в продольном (а) и конструкция индукционного нагревателя в поперечном (б) магнитных полях представлена на рис. 14.

Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными представлено на рис. 15. Разработанные модели повторяют спроектированные натурные образцы и реальные условия нагрева [7]. В качестве исходных данных для расчета выступили конструктивные параметры разработанных индукторов (рис. 13), электро – теплофизические свойства всех объектов системы и электрические параметры системы. Основные параметры экспериментальной системы отражены в табл. 1 (см. рис. 16).

Таблица 1

**Основные параметры экспериментальной системы**

Table 1

**The main parameters of the experimental system**

| Внешний диаметр, мм | Рабочая частота, кГц | Время нагрева, с | Мощность, кВт | Скорость вращения заготовки, об/мин |
|---|---|---|---|---|
| 268 – 420 | 2,5 | 30 | 15 – 44 | 18 |

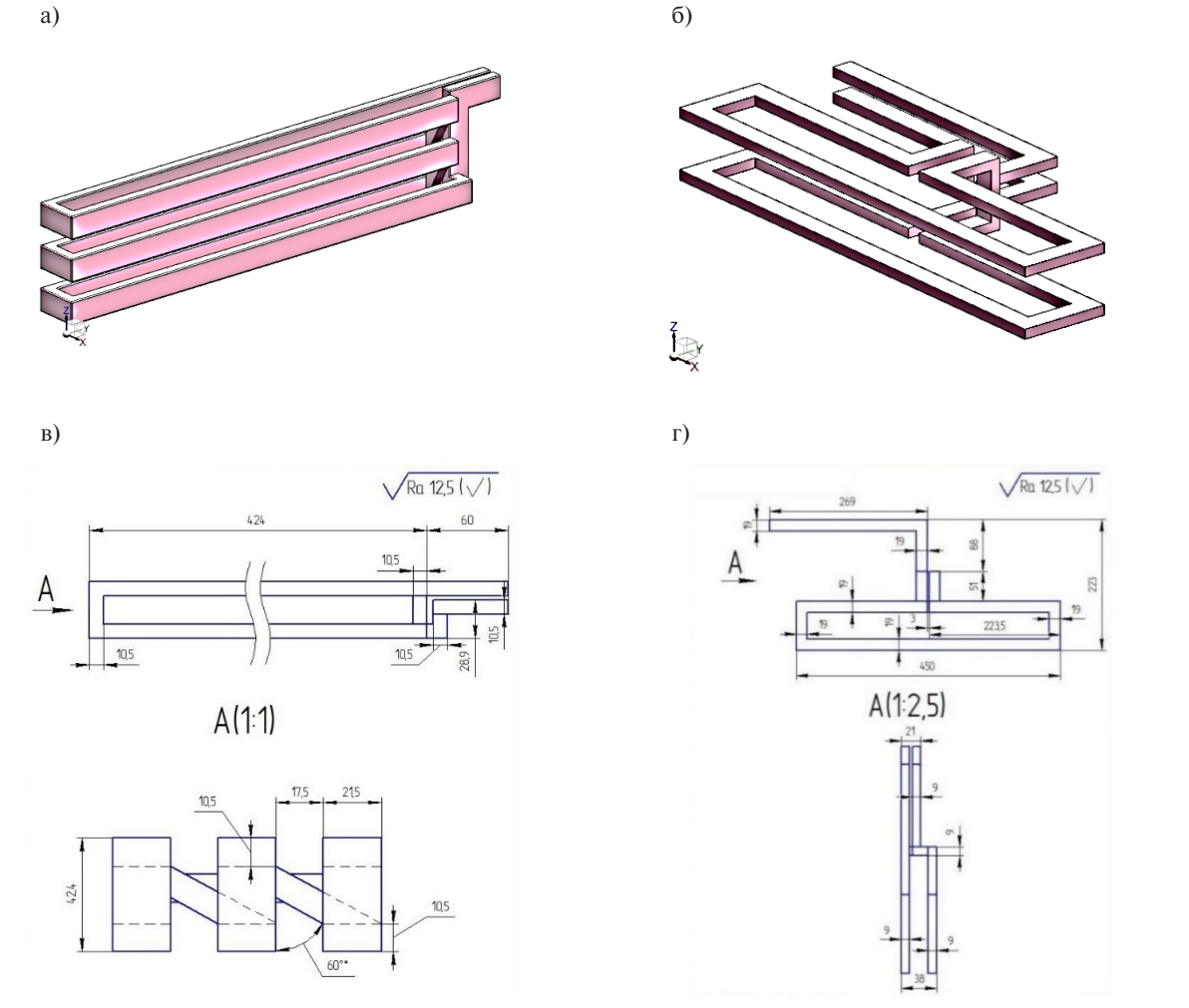


Рис. 13. Конструкции индукторов для обеспечения локального нагрева в а) продольном и б) поперечном магнитном поле

Fig. 13. Designs of inductors to provide local heating in a) longitudinal and b) transverse magnetic field

Как видно из представленных в настоящей работе данных, кромки диска, за счет тепловых потерь через излучение, обладают более низкой температурой относительно требуемого уровня, а максимум температуры по радиусу диска смещен в сторону центра нагреваемого образца.

Ввиду влияния рабочей частоты и конструкции индуктора на конечный температурный профиль металлического диска, автором был смоделирован его сквозной нагрев под отпуск. Это позволило обеспечить минимизацию перепада температур по сечению диска в зоне нагрева. При численном исследовании, однако, не было учтено наличие закаленного слоя.

Наблюдается высокая идентичность результатов расчетов и экспериментальных данных при нагреве в продольном и поперечном магнитном поле. На основе анализа основных концепций нагрева установлено, что нагрев в поперечном магнитном поле является более эффективным, однако нагрев в продольном магнитном поле обладает также высокой эффективностью при нагреве изделий с простым профилем.

## Заключение

1) Освещены научно-технические решения, сопряженных со спецификой термообработки дисков, определены критерии оценки технологической эффективности, выполнена оценка влияния краевых эффектов и вращения диска в процессе нагрева на эффективность нагрева.

а) б)

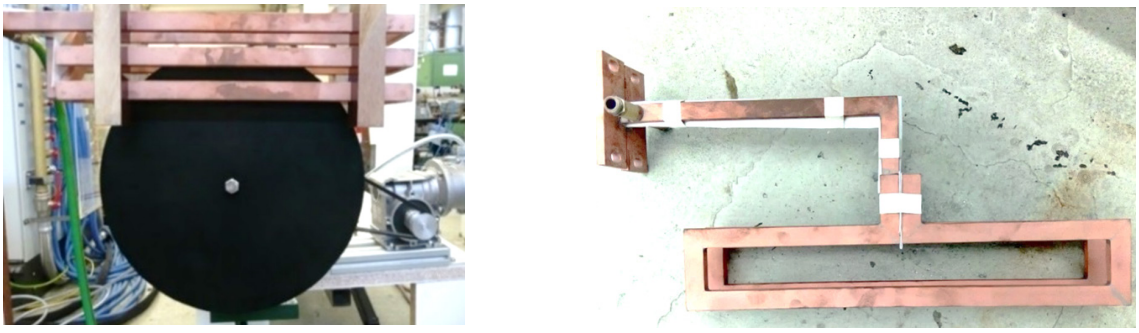

Рис. 14. Лабораторный стенд индукционной системы нагрева в продольном (а) и конструкция индукционного нагревателя в поперечном (б) магнитных полях

Fig.14. Laboratory stand of the induction heating system in the longitudinal (a) and the design of the induction heater in the transverse (b) magnetic fields

а) б)

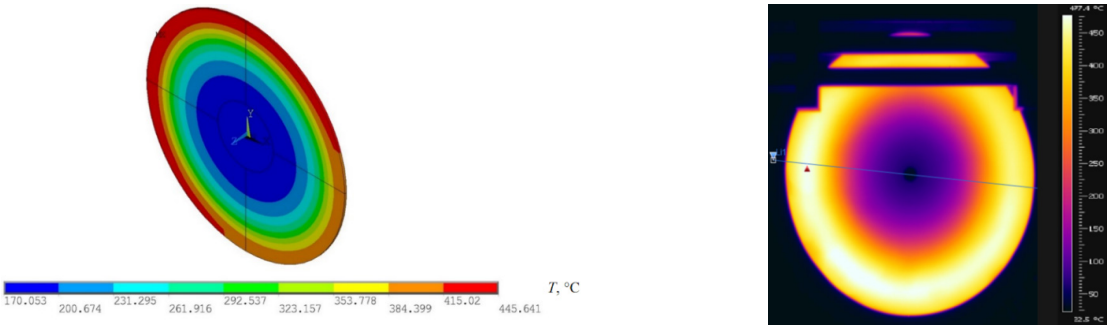


Рис. 15. Сравнение результатов моделирования (а) с экспериментальными данными (б); получены для температурного распределения по поверхности заготовки при нагреве диска вращением в высокочастотном продольном магнитном поле; б – прямая, проходящая от края диска к его центру указывает направление, вдоль которого произведен замер температуры; красный треугольник указывает максимальную температуру на поверхности диска.

Fig.15. Comparison of simulation results (a) with experimental data (b); obtained for temperature distribution over workpiece surface with disk heated by rotation in high-frequency longitudinal magnetic field; b is the straight line passing through the center of the disk indicating the direction along which the temperature was measured; the dark triangle indicates the maximum temperature on the surface of the disk

2) На основе компьютерных исследований выполнена оценка эффективности нагрева различных концепций индукционного нагрева, исследовано влияние конструкций нагревателей на распределение электромагнитных и тепловых полей в диске. Разработанные расчетные методики и численные модели поспособствовали минимизации затраты на проведении экспериментальной части работ при изготовлении индукторов под каждый типо-размер дисков и демпферных пружин и выполнению термообработки с высокой эффективностью.

3) Спроектированы и изготовлены конструкции индукционных нагревателей дисков.

4) Результаты, полученные методом численного моделирования на базе разработанных программ, полностью согласуются с физическими закономерностями исследуемых процессов, протекающих при индукционном нагреве диска. Полученные данные свидетельствуют о высокой сходимости результатов.

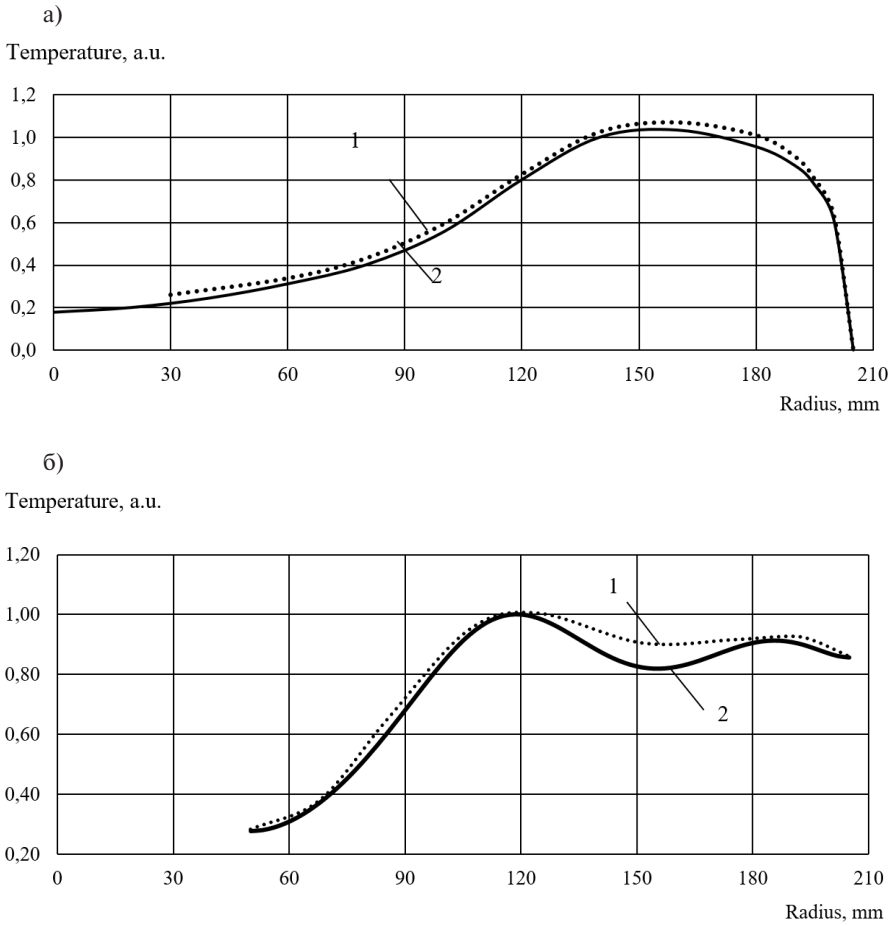


Рис. 16. Температурные профили на поверхности заготовки вдоль радиуса при нагреве диска в продольном (а) и поперечном (б) магнитных полях: 1 – результаты моделирования, 2 – экспериментальные данные

Fig. 16. Temperature profiles on workpiece surface along the radius with disk heated in the longitudinal (a) and transverse (b) magnetic fields: 1 corresponds to simulation results, 2 to experimental data

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Шепеляковский К.З.** Упрочнение деталей машин поверхностной закалкой при индукционном нагреве. – М.: Машиностроение, 1972. – 287 с.

[2] Численное моделирование устройств индукционного нагрева / В.Б. Демидович, Ф.В. Чмиленко. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. С. 157.

[3] Исследования и применение бесконтактной системы измерений температур вращающихся дисков турбин при индукционном нагреве / А.Б. Кувалдин, А.Р. Лепешкин, С.А. Лепешкин // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике. 2015. Т. 1. С. 277–281.

[4] Метод нагрева и закалки зубчатых колес при вращении в магнитном поле / Кувалдин А.Б., Лепешкин А.Р., Лепешкин С.А. В сборнике: ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ – XXI ВЕК материалы XII межд. Науч.-практ. интернет-конф. 2016. С. 147–151.

[5] **Кувалдин А.Б., Лепешкин А.Р., Лепешкин С.А.** Моделирование режимов индукционного нагрева дисков турбин ГДТ с использованием специальных индукторов // В сборнике: Электротехника. Электротехнология. Энергетика сборник научных трудов VII межд. науч. конф. мол. ученых. Организаторы: НГТУ; Межвуз. центр сод. науч. и инновац. деят. студ. и мол. уч. Новосибирской области. 2015. С. 70–73.

[6] Simulation algorithm for induction heating of rotated workpieces with complex shape / E. Mannanov, S. Galunin, A. Nikanorov, B. Nacke // XVIII International UIE – Congress "Elec-trotechnologies for Material Processing", Hannover (Germany), June 6-9, 2017. Pp. 491–496.

[7] **Mannanov E.R., Galunin S.A., Nikanorov A.N., Nacke B., Kozulina T.P.** Development of induction systems for heating of disks, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 12 (2) (2019) 23–31. DOI: 10.18721/JPM.12202

[8] **Mannanov E.R., Galunin S.A.** The heating of a diaphragm spring using induction technique: parametric modeling, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 12 (4) (2019) 61–68. DOI: 10.18721/JPM.12406

[9] Numerical simulation, investigation and development of induction systems for heating disks with complex profile / E. Mannanov, S. Galunin, M. Yermekova, A. Nikanorov, B. Nacke // Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW), 2019 IEEE NW Russia. – 2019. – Pp. 606–608. DOI: 10.1109/EIConRus.2019.8656912

[10] **Mannanov E., Galunin S.** Numerical simulation of the induction heating process of a disk profile // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 643 (2019) 012065 November 2019. Pp. 1–7. DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012065

[11] **Mannanov E., Galunin S., Shatunov A.** Numerical modeling of induction heating systems with load of azimuthal periodicity // EECE-2019 E3S Web of Conferences 140, 10009 (2019) Pp. 1–6. DOI.org/10.1051/e3sconf/201914010009

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**МАННАНОВ Эмиль Рамилевич** – *инженер-конструктор 1 категории, АО «Силовые машины», без степени.*
E-mail: emil-mannanov@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9988-793X

**ГАЛУНИН Сергей Александрович** – *заведующий кафедрой электротехнологической и преобразовательной техники, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина), канд. техн. наук.*
E-mail: galunin@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8382-3111

## REFERENCES

[1] **K.Z. Shepelyakovskiy,** Uprochneniye detaley mashin poverkhnostnoy zakalkoy pri induktsionnom nagreve. – M.: Mashinostroyeniye, 1972. – 287 s.

[2] Chislennoye modelirovaniye ustroystv induktsionnogo nagreva / V.B. Demidovich, F.V. Chmilenko. – SPb.: Izd-vo SPbGETU «LETI», 2010. S. 157.

[3] Issledovaniya i primeneniye beskontaktnoy sistemy izmereniy temperatur vrashchayushchikhsya diskov turbin pri induktsionnom nagreve / A.B. Kuvaldin, A.R. Lepeshkin, S.A. Lepeshkin // Avtomatizatsiya v elektroenergetike i elektrotekhnike. 2015. T. 1. S. 277–281.

[4] Metod nagreva i zakalki zubchatykh koles pri vrashchenii v magnitnom pole / Kuvaldin A.B., Lepeshkin A.R., Lepeshkin S.A. V sbornike: ENERGO- I RESURSOSBEREZhENIE – XXI VEK materialy XII mezhd. Nauch.-prakt. internet-konf. 2016. S. 147–151.

[5] **A.B. Kuvaldin, A.R. Lepeshkin, S.A. Lepeshkin,** Modelirovaniye rezhimov induktsionnogo nagreva diskov turbin GDT s ispolzovaniyem spetsialnykh induktorov // V sbornike: Elektrotekhnika. Elektrotekhnologiya.

Energetika sbornik nauchnykh trudov VII mezhd. nauch. konf. mol. uchenykh. Organizatory: NGTU; Mezhvuz. tsentr sod. nauch. i innovats. deyat. stud. i mol. uch. Novosibirskoy oblasti. 2015. S. 70–73.

[6] Simulation algorithm for induction heating of rotated workpieces with complex shape / E. Mannanov, S. Galunin, A. Nikanorov, B. Nacke // XVIII International UIE – Congress "Electrotechnologies for Material Processing", Hannover (Germany), June 6-9, 2017. Pp. 491–496.

[7] **E.R. Mannanov, S.A. Galunin, A.N. Nikanorov, B. Nacke, T.P. Kozulina,** Development of induction systems for heating of disks, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 12 (2) (2019) 23–31. DOI: 10.18721/JPM.12202

[8] **E.R. Mannanov, S.A. Galunin,** The heating of a diaphragm spring using induction tech-nique: parametric modeling, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 12 (4) (2019) 61–68. DOI: 10.18721/JPM.12406

[9] Numerical simulation, investigation and development of induction systems for heating disks with complex profile / E. Mannanov, S. Galunin, M. Yermekova, A. Nikanorov, B. Nacke // Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW), 2019 IEEE NW Russia. – 2019. – Pp. 606–608. DOI: 10.1109/EIConRus.2019.8656912

[10] **E. Mannanov, S. Galunin,** Numerical simulation of the induction heating process of a disk profile // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 643 (2019) 012065 November 2019. Pp. 1–7. DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012065

[11] **E. Mannanov, S. Galunin, A. Shatunov,** Numerical modeling of induction heating systems with load of azimuthal periodicity // EECE-2019 E3S Web of Conferences 140, 10009 (2019). Pp. 1–6. DOI.org/10.1051/e3sconf/201914010009

## THE AUTHORS

**MANNANOV Emil R.** – *JSC "Power machines".*
E-mail: emil-mannanov@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9988-793X

**GALUNIN Sergei A.** – *St. Petersburg Electrotechnical University "LETI".*
E-mail: galunin@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8382-3111

**Статья поступила в редакцию 20.09.2021; одобрена после рецензирования 06.10.2021; принята к публикации 06.10.2021.**
**The article was submitted 20.09.2021; approved after reviewing 06.10.2021; accepted for publication 06.10.2021.**

# Металлургия и материаловедение
# Metallurgy and Materials

Обзорная статья
УДК 67.017
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.28102

*Е.Д. Васильева*[1] ✉ , *А.А. Васильева*[2], *А.К. Кычкин*[2]

[1] Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр СО РАН», г. Якутск, Россия;

[2] Институт физико-технических проблем Севера им. В.Р. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Россия

✉ vasilyeva_edm@mail.ru

## К ВОПРОСУ О МЕТОДАХ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЛАГИ НА ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

*Аннотация.* Интерес в области изучения влияния воздействия влаги на свойства полимерных композиционных материалов не иссякает и по сей день. Негативное воздействие влаги на прочностные и эксплуатационные свойства является тем фактором, прогноз которого необходим для обеспечения надежности и продолжительности эксплуатации полимерных композиционных материалов. В данном обзоре рассматриваются методы определения поглощения и диффузии влаги в полимерных материалах с волокнистыми (ткаными) наполнителями на основе эпоксидной смолы, действующие отечественные и зарубежные нормативы определения влагосодержания в полимерных композиционных материалах, методы определения и оценки воздействия поглощенной влаги на полимерные композиционные материалы, включая условия эксплуатации и производственные процессы (состояние отверждения). Кратко приведены данные по влиянию климатических факторов на полимерные композиционные материалы за последние пару лет. Обзор будет полезен для исследователей, занимающихся проблемой влагопоглощения и водопоглощения композиционными материалами в виде обобщения накопленных знаний по данной проблематике в целях анализа поведения полимерных материалов в долгосрочный период.

*Ключевые слова:* полимерные композиционные материалы, влага, вода, сорбция, поглощение, диффузия, климатические испытания, нормативная документация.

*Благодарности:* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации №0297-2021-0041.

*Для цитирования:*

Васильева Е.Д., Васильева А.А., Кычкин А.К. К вопросу о методах исследования воздействия влаги на полимерные композиционные материалы // Материаловедение. Энергетика. 2022. Т. 28, № 1. С. 21–31. DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.28102

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Васильева Е.Д., Васильева А.А., Кычкин А.К., 2022. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Overview article
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.28102

*E.D. Vasilyeva*[1] ✉ , *A.A. Vasilyeva*[2], *A.A. Kychkin*[2]

[1] Federal Research Centre "The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences", Yakutsk, Russia;

[2] V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS, Yakutsk, Russia

✉ vasilyeva_edm@mail.ru

# ON THE METHODS OF STUDYING THE IMPACT OF MOISTURE ON POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS

*Abstract*. The study of the influence of moisture on the properties of polymer composite materials has been drawing attention to this day. The negative impact of moisture on the strength and performance properties is the factor, the forecast of which is necessary to ensure the reliability and durability of polymer composite materials. This review considers methods for determining moisture absorption and diffusion in polymer materials with fibrous (woven) fillers based on epoxy resin; current domestic and foreign standards for determining moisture content in polymer composite materials; methods for determining and assessing the effect of absorbed moisture on polymer composite materials, including conditions of operation and manufacturing processes (curing state). The data on the influence of climatic factors on polymer composite materials for the last couple of years are briefly presented. The review will be useful for researchers dealing with the problem of moisture absorption and water absorption by composite materials in the form of a generalization of the accumulated knowledge on this topic in order to analyze the long-term behavior of polymer materials.

*Keywords:* polymer composite materials, moisture, water, sorption, absorption, diffusion, climatic tests, regulatory documentation.

*Acknowledgements:* The work was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 0297-2021-0041.

*Citation:*

E.D. Vasilyeva, A.A. Vasilyeva, A.A. Kychkin, On the methods of studying the impact of moisture on polymeric composite materials, Materials Science. Power Engineering, 28 (01) (2022) 21–31, DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.28102

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

**Введение.** В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) нашли широкое применение в различных областях производства ввиду своих физических, химических, технологических и служебных свойств [1–3]. Преимущество ПКМ заключается в вариативности и возможности улучшать отдельные показатели ранее изученных ПКМ. К недостаткам ПКМ можно отнести снижение прочностных характеристик, происходящих в результате физико-химических процессов, протекающих в полимерной матрице (усадка, деструкция, расслоение, пористость) и в межфазном слое полимер-наполнитель (разрыв связи, непроклей, расслоение, разрыв волокна). Степень изменения прочностных показателей зачастую зависит от вида и содержания связующего и наполнителя, технологии получения ПКМ [4] и т.д.

Среди большинства факторов отрицательно влияющих на конструкционные показатели ПКМ при длительном воздействии особо выделяется влияние влаги, запускающее процесс деградации полимерных систем. Впитанная полимерным композитом влага вызывает ряд проблем, таких как

© E.D. Vasilyeva, A.A. Vasilyeva, A.A. Kychkin, 2022. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

изменение теплофизических, механических и химических характеристик полимерной матрицы в результате пластификации, гидролиза, набухания, разрыва связей, расслоения и т.д.

Значительная часть исследований по определению влияния влаги на прочностные характеристики ПКМ посвящена воздействию атмосферной влаги, иначе называемом изучением влагонасыщения или влагопоглощения. Однако влага в ПКМ может проникать и при непосредственном контакте с поверхностью материала. Такие испытания проводят путем погружения образцов в воду (водопоглощение) до достижения исследуемым образцом равновесного состояния.

Целью данной работы является обзор основных методов исследования воздействия влаги на ПКМ, определение показателей, которым характерно изменение величины под воздействием поглощенной влаги, а также обобщение существующих методик и нормативных документов по определению влагосодержания.

В обзоре Duncan и Broughton [5] процесс проникновения химических веществ через полимеры представляют в виде комбинации двух взаимосвязанных процессов: растворение в полимере, диффузия через полимер. Под растворением авторы понимают процесс поглощения воды в полимер, зависящий от энергии взаимодействия полимера к поглощаемым молекулам воды, доступной удельной поверхности полимера и концентрации поглощаемой воды. Процесс массопереноса (иначе диффузии влаги) в ПКМ предлагается связывать с характеристиками волокнистого материала, объемной доли и ориентации волокон в ПКМ [6]. Под градиентом концентрации, при котором поглощенные молекулы воды транспортируются внутри полимера, понимается диффузия влаги в полимер, а диффузионные свойства определяются посредством коэффициента диффузии. Значительную долю начального поглощения влаги авторы связывают с капиллярным действием вдоль волокон или границ раздела полимер-наполнитель. Основной причиной, способствующей капиллярному эффекту, авторы рассматривают технологические дефекты при получении ПКМ, а именно с усадкой смолы вдали от волокон во время процесса отверждения. Для описания закономерности диффузии влаги в полимер используется закон диффузии Фика, основанный на аналогии между диффузией и теплопроводностью, предложенной Фурье и Омом. Предпочтение модели Фика связано с возможностью подобрать модельное уравнение к экспериментальным данным сорбции. Однако для более длительных периодов испытаний данная модель не удовлетворяет требованию допустимой погрешности для описания процесса поглощения влаги в полимер, что вызывает необходимость разработки новых моделей для адекватного описания и прогнозирования диффузии влаги в полимер.

Положительное воздействие влаги на прочность в углепластиках в работе [7] при повышенной температуре авторы объясняют пластифицирующим действием сорбированной влаги в эпоксидной матрице, которая приводит к релаксации внутренних напряжений в объеме углепластика. Равномерный прирост массы сорбированной влаги приостанавливается по достижению равновесного влагосодержания за 30 дней. В работе рассмотрено влияние аппрета на влагопоглощение и водопоглощение. После удаления излишка аппрета с наполнителя в углепластиках повысилась плотность и снизилась пористость, что стало причиной снижения водопоглощения в 1,5 раза и влагопоглощения в 2,6 раза.

Пластифицирующее влияние влаги на ПКМ подтверждают работы [8, 9, 20, 22, 24, 27]. В первом исследовании сравнивали пределы прочности при изгибе ГОСТ 25.604-82, сжатии ГОСТ 25.602-80 и сдвиге EN 2563 и температуры расстекловывания ASTM E 228-85 при минимальном и максимальном равновесном влагосодержании. При максимальном равновесном влагосодержании больше всего уменьшается относительная прочность при изгибе, в меньшей степени относительные прочности при сжатии и сдвиге. При этом после высушивания образцов прочностные характеристики восстанавливались до 100 %, что является доказательством обратимого эффекта воздействия влаги, подробно описанных в работах [10, 20, 24]. Температура расстекловывания

при максимальном равновесном влагосодержании расширяется и после высушивания образца сужается и смещается в зону более высоких температур.

В настоящее время в основном существует три вида анализа для получения результатов, связанных с кинетикой поглощения влаги в пористых материалах: аналитический, численный и экспериментальный. Недостаток проведения экспериментов по влагопоглощению в лаборатории состоит в том, что результаты зависят от заранее определенных условий эксплуатации. Как правило, процесс влагопоглощения происходит очень медленно, поэтому материалу требуется длительная экспозиция для достижения состояния влагонасыщения. Аналитические методы ограничены задачами, гипотезы которых упрощены и применяются простой геометрии, что ограничивает использование. С другой стороны, численные методы практически не ограничены, могут использоваться в более сложных задачах с граничными условиями, заданными в произвольной геометрии [10–19].

Модель Ленгмюра описывает такой механизм, когда одна молекула воды может свободно перемещаться в объеме полимера, в то время как остальная часть молекул воды связывается с полимерной матрицей композита. При этом свободная молекула воды может стать «связанной» молекулой, а связанная молекула воды может стать свободной. Такой эффект может быть рассчитан с использованием двух дополнительных параметров: $\lambda$ – вероятностью захвата свободной молекулы воды и $\mu$ - вероятностью того, что захваченная молекула станет свободной. Таким образом, эта модель включает параметры молекулярного взаимодействия воды и полимера (свободного и связанного состояния молекул воды), а также дает описание процесса динамического обмена между двумя фазами. Следовательно, модель Ленгмюра является улучшенной версией диффузионной модели Фика, известная как аномальная модель или нефиковская модель диффузии влаги.

При изучении структурных изменений в ПКМ, вызванных воздействием влаги, широко используются следующие методы: термомеханический анализ (ТМА), динамический механический анализ (ДМА), термогравиметрический (ТГА), дифференциально сканирующая калориметрия (ДСК), инфиксная спектроскопия (ИК-спектроскопия), сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), растровая электронная микроскопия (РЭМ), акустический метод.

Вышеперечисленные работы направлены на изучение диффузии влаги в полимер в одномерном пространстве. Тем временем увеличивается количество исследований, в которых используется дву- и трехмерный подходы [23–24], в частности, влияние водного слоя на поверхности композита. Следовательно, для прогнозирования явления проникновения влаги в ПКМ необходима адекватная математическая модель в сочетании с ее аналитическим и/или численным решением.

Большинство исследований, направленных на выявление влияния влаги на свойства полимерных композиционных материалов (ПКМ), сводятся к определению массы влаги (воды), поглощенной в течение установленного времени при определенной температуре. Предварительная подготовка образцов сводится к выбору образцов дублера и подвергаемого испытаниям одинаковых геометрических форм и размеров с последующим высушиванием до момента прекращения изменения массы образцов. В случае, когда это необходимо, проводится обработка кромки образцов ПКМ.

Согласно действующим нормативным документам отечественных и зарубежных изданий, можно отметить следующее:

- ISO 62, ASTM D 570 и ГОСТ 4650-80 являются стандартными методами измерения поглощения воды с погружением при различных температурах с использованием гравиметрического метода.
- ГОСТ 12423-2013 является модифицированным по отношению к международному стандарту ISO 291:2008 путем введения дополнений и уточнений. В качестве рабочей жидкости может быть использована не только дистиллированная вода.

• ГОСТ Р 56762-2015, ASTM D5229/D5229M, ГОСТ 4650-80, ISO 62:2008 регламентируют проведение испытаний в условиях кондиционирования и расчета однофазного коэффициента диффузии влаги по Фику, что не в полной мере описывает процесс диффузии влаги в многослойных ПКМ. Для расчета показателя содержания влаги в % и коэффициента диффузии по модели Фика используется прямолинейный участок кинетической кривой. По полученному или известному коэффициенту диффузии возможно оценить значение предельного влагосодержания ПКМ без учета поврежденной кромки.

• Для всех испытуемых образцов регламентируются необходимые для получения достоверных результатов геометрические размеры и процедуры подготовки к испытаниям.

• Существующие регламенты для определения степени влагопоглощения и водопоглощения ПКМ дают описания условий кондиционирования и воздействия внешних условий для расчета показателя содержания влаги в % и коэффициента диффузии по второму закона Фика. При расчете коэффициента диффузии по модели Фика используется прямолинейный участок кинетической кривой, получаемый на стадии сорбции.

• Все измерения проводятся гравиметрическим способом.

• В процессе диффузии влаги предварительно кондиционированные образцы подвергаются воздействию контролируемой атмосферы (концентрация паров и температура), при которой будет происходить конденсация пара на поверхности. Следовательно сконденсированная влага в виде тонкой пленки будет влиять на результаты исследования воздействия влажности. Как известно, прямой контакт с жидкостью, а не с ее паром обычно приводит к большему уровню поглощения (более высоким концентрациям насыщения), а значит возможны расхождения по данным коэффициента диффузии и содержания влаги в ПКМ.

• Расчет однофазного коэффициента диффузии влаги по Фику не в полной мере описывает процесс диффузии влаги в многослойных ПКМ. Модель диффузии Фика для более длительных периодов испытаний не удовлетворяет требованию допустимой погрешности для описания процесса поглощения влаги в полимер, что вызывает необходимость разработки новых моделей для достоверного описания и прогнозирования диффузии влаги в полимер.

Данные стандарты не дают исчерпывающей методической информации, в частности в обработке и оценке результатов испытаний, а также прогнозирования изменений свойств ПКМ и измерений, необходимых для предоставления данных для проектирования.

Значительная часть исследований по определению влияния влаги на прочностные характеристики ПКМ посвящена воздействию атмосферной влаги при проведении климатических испытаний в лабораторных и натурных условиях [6–7, 20–30]. Так в работе [29] поглощенная стеклопластиком атмосферная влага была инициатором гидролиза и процесса до отверждения матрицы композита, в то же время обладала пластифицирующим действием.

Согласно ГОСТ 9.707-81 процессы старения, протекающие в материале, должны быть одинаковы, как в лабораторных, так и в натурных испытаниях. Исходя их этого, авторы [26] предлагают выбирать температуру испытаний образцов ПКМ в условиях хранения (открытая площадка) как максимальную температуру воздуха по ГОСТ 15150 с учетом перегрева материала, в том числе вследствие действия солнечной радиации. Влажность ПКМ предлагается определять исходя из эффективных значений температурно-влажностного комплекса для предполагаемых условий эксплуатации ПКМ.

В работах зарубежных исследователей [17] встречается термин гигротермическое воздействие, которое влияет на снижение температуры стеклования полимеров и может спровоцировать пластификацию полимерной матрицы, приводящей к снижению доминирующих свойств сопротивления матрицы. Гигротермический эффект, по сути, есть гидротермический эффект, определяющий условия проведения климатических испытаний [21], который способствует увеличению пустот, расширению полимерной цепи и вызывает микротрещины в матрице. Деструктив-

ные изменения происходят, как правило, из-за деградации физико-химических взаимодействий между смолой и волокном, и, как следствие, происходит смещение волокна, вызывающее расслоение композита и в итоге снижение свойств материала. Уровень напряжений в ПКМ существенно влияет на кинетику диффузии влаги. Это ставит под сомнение правильность стандартных методик оценки работоспособности ПКМ, находящихся в непосредственном контакте с влажной средой, на образцах в свободном, ненагруженном состоянии. Обобщение результатов таких исследований поведения материала в нагруженном состоянии является несопоставимым. Таким образом, подтверждается необходимость проведения испытаний образцов ПКМ с приложением статических нагрузок эксплуатационного уровня, как в натурных, так и в лабораторных исследованиях.

В работе [27] показано, что для образцов углепластика ВКУ-38 достижение равновесного водопоглощения для образцов после экспонирования достигается быстрее, чем для исходных образцов. Равновесное водопоглощение устанавливается на 30-40 сутки. При этом значения равновесного водосодержания были выше у образцов, экспонируемых в условиях умеренного климата (г. Москва) и очень холодного климата (г. Якутск) – до 1,1 %. Причиной увеличения значения водопоглощения и изменения характера кривых сорбции углепластиков при длительном экспонировании стало изменение поверхностного рельефа и наличие дефектов на поверхности материалов, что подтверждается работой [28] для экстремально холодного климата.

Воздействие на ПКМ естественно-климатических факторов в работе [25] привело к снижению межфазной передачи напряжений из-за пластификации матрицы, химических изменений и механического разложения на границе раздела фаз. Результаты испытаний на растяжение композитов эпоксидная смола/MWCNT после термовлажностного старения показали, что из-за пластификации увлажненных ПКМ, снижение модуля упругости и прочности было практически одинаковыми (5-8 % и 18-22 % соответственно). Такой эффект связан с изменением внутреннего напряжения, условий и разрыва связи из-за объемного расширения между наночастицами и полимерной матрицей [30].

Проведение испытаний в лабораторных условиях обеспечивает получение сведений, необходимых для оценки изменения свойств материалов при воздействии климатических факторов. Однако полученные в условиях лабораторных испытаний результаты не могут корректно описывать взаимосвязи с результатами, полученными при натурных климатических испытаниях, и чаще всего носят оценочный характер.

Прогнозирование срока службы материала и эксплуатационных условий ПКМ не всегда корректно прогнозируются, так как климатические испытания проводятся в основном в статических условиях. Испытания ПКМ на стойкость при совместном воздействии механических нагрузок и климатических факторов не так хорошо изучены в связи с отсутствием соответствующей нормативной документации и технических возможностей. Отсутствие информации о влиянии динамических механических (циклических) и других эксплуатационных нагрузок (тепловых, коррозионных и др.) на свойства ПКМ при старении в природных средах приводит к неблагоприятным последствиям.

**Выводы**

1. Для оценки возможности протекания необратимых/обратимых процессов под воздействием диффузии влаги в матрицу ПКМ необходимо проводить изучение изменения свойств влагонасыщенного и просушенного композиционного материала с контролем структурных изменений, происходящих внутри и на поверхности испытуемых образцов.

2. При оценке и прогнозе степени ухудшения прочностных свойств ПКМ, необходимо изучить динамику поглощения влаги и получить значение равновесного содержания влаги. В целях предупреждения потенциального отказа конструкционного материала в процессе эксплуатации,

необходимо разработать модель с достаточной вероятностью прогнозирования количества влаги, поглощенной композитным материалов в установленный момент времени в конкретных условиях.

3. Согласно изученным экспериментальным данным при климатических испытаниях увеличение значений влагопоглощения связано с процессами деструкции и выветривания полимерного связующего в поверхностном слое, разрастании микротрещин в глубь материала, увеличении количества микропор и, как вследствие, расслоение и снижение адгезии полимер-наполнитель. При разработке модели прогнозируемого влагопоглощения для конкретного композитного материала требуется экспериментальное определение диффузионных свойств полимера в зависимости от геометрических размеров, анизотропии материала, характера распределения концентрации влаги, явлений на границе полимер-наполнитель, краевых и температурных эффектов.

4. Для оценки снижения физико-химических и механических свойств ПКМ, в ходе проведения натурных испытаний, необходимо провести предварительные ускоренные климатические испытания с имитацией эксплуатационных условий с фиксированием исходных и подвергнутых изменениям показателей в соответствии с метеорологическими данными по региону.

5. Для понимания механизмов деструкции ПКМ подвергнутым натурным климатическим испытаниям необходимо проводить измерение кинетики влагосодержания экспонируемых образов с целью выявления закономерностей при разработке математической модели сопоставимой с экспериментальными данными, получаемыми при экспонировании образцов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Раскутин А.Е.** Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // Авиационные материалы и технологии. 2017. С. 349–367.

[2] **Rajak D.K., Pagar D.D., Menezes P. L., Linul E.** Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications, Polymers 11, 1667 (2019), 11 p. 37.

[3] **Kar K.K.** Composite Materials. Processing, Application, Characterization. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2017.

[4] **Вешкин Е.А., Старцев В.О., Постнов В.И., Баранников А.А.** Климатические воздействия как оценка ремонтопригодности изделий из углепластика // Труды ВИАМ. 2019. № 8. С. 98–108.

[5] **Duncan B., Broughton W.** Absorption and diffusion of moisture in polymeric materials. Measurement Good Practice Guide. National Physical Laboratory Teddington, Middlesex, UK, 2007.

[6] **Vaddadi P., Nakamura T., Singh R.P.** Inverse analysis for transient moisture diffusion through fiber-reinforced composites, Acta Mater, 51 (2003) 177–193.

[7] **Начаркина А.В., Зеленина И.В., Валуева М.И., Воронина О.Г.** Влияние аппретирования углеродного волокна при получении объемно-армированных преформ на свойства высокотемпературного углепластика // Труды ВИАМ. 2021. № 1. 12 с.

[8] **Николаев Е.В., Кириллов В.Н., Скирта А.А., Гращенков Д.В.** Исследование закономерностей влагопереноса и разработка стандарта по определению коэффициента диффузии и предельного влагосодержания для оценки механических свойств углепластиков // Авиационные материалы и технологии. 2013. № 3 (28) 5 с.

[9] **Joliff Y., Belec L., Chailan J.F.** Modified water diffusion kinetics in an unidirectional glass/fiber composite due to the interphase area: Experimental, analytical and numerical approach, Compos. Struct. 97 (2013) 296–303.

[10] **Bond D.A.** Moisture Diffusion in a fiber-reinforced composite: Part I. Non-Fickian transport and the effect of fiber spatial distribution, J. Compos. Mater, 39 (2004) 2113–2141.

[11] **Peret T., Clement A., Freour S., Jacquemin F.** Numerical transient hygro-elastic analyses of reinforced Fickian and non-Fickian polymers, Compos. Struct., 116 (2014) 395–403.

[12] **Laplante G., Ouriadov A.V., Lee-Sullivan P., Balcom B.J.** Anomalous moisture diffusion in an epoxy adhesive detected by magnetic resonance imaging, J. Appl. Polym. Sci., 109 (2008) 1350–1359.

[13] **Dhakal H.N., Zhang Z.Y., Richardson M.O.W.** Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fiber reinforced unsaturated polyester composites, Compos. Sci. Technol., 67 (2007) 1674–1683.

[14] **Carter H.G., Kibler K.G.** Langmuir-Type model for anomalous moisture diffusion in composite resins, J. Compos. Mater, 12 (1978) 118–131.

[15] **Laplante G., Ouriadov A.V., Lee-Sullivan P., Balcom B.J.** Anomalous moisture diffusion in an epoxy adhesive detected by magnetic resonance imaging, J. Appl. Polym. Sci., 109 (2008) 1350–1359.

[16] **Peret T., Clement A., Freour S., Jacquemin F.** Numerical transient hygro-elastic analyses of reinforced Fickian and non-Fickian polymers, Compos. Struct., 116 (2014) 395–403.

[17] **Glaskova-Kuzmina T., Zotti A., Borriello A., Zarrelli M., Aniskevich A.** Basalt Fibre Composite with Carbon Nanomodified Epoxy Matrix under Hydrothermal Ageing, Polymers, 13, 532 (2021). P. 13.

[18] **Korkees F., Alston S., Arnold C.** Directional diffusion of moisture into unidirectional carbon fiber/epoxy, Composites: Experiments and modeling, Polym. Compos., 39 (2018) 2305–2315.

[19] **Zile E., Aniskevich A., Zeleniakiene D.** Anisotropic water diffusion in mechanical joints of fiber-reinforced composite panels: numerical study, J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng., 42 (490) (2020) 7 p.

[20] **Старцев В.О., Плотников В.И., Антипов Ю.В.** Обратимые эффекты влияния влаги при определении механических свойств ПКМ при климатических воздействиях // Труды ВИАМ. 2018. № 5. С. 110–118.

[21] **Гладких А.В., Курс И.С., Курс М.Г.** Анализ данных натурных климатических испытаний, совмещенных с приложением эксплуатационных факторов, неметаллических материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 10. 9 с.

[22] **Гуляев И.Н., Зеленина И.В., Валевин Е.О., Хасков М.А.** Влияние климатического старения на свойства высокотемпературных углепластиков // Труды ВИАМ. 2021. № 2. 13 с.

[23] **Sethi S., Ray B.C.** Computational identification of adsorption and desorption parameters for pore scale transport in periodic porous media, Journal of Computational and Applied Mathematics, 370 (2020) 16 p.

[24] **Fan Y., Gomez A., Ferraro S., Pinto B., Muliana A., La Saponara V.** Diffusion of water in glass fiber reinforced polymer composites at different temperatures, Journal of Composite Materials, 53 (2019) 1097–1110.

[25] **Славин А.В., Старцев О.В.** Свойства авиационных стеклопластиков и углепластиков на ранней стадии климатического воздействия // Труды ВИАМ. 2018. № 9. С. 71–82.

[26] **Панин С.В., Старцев О.В., Кротов А.С.** Диагностика начальной стадии климатического старения ПКМ по изменению коэффициента диффузии влаги // Труды ВИАМ. 2014. № 7. С. 1–9.

[27] **Старцев О.В., Лебедев М.П., Кычкин А.К.** Старение полимерных композиционных материалов в условиях экстремально холодного климата // Известия АлтГУ. Физика. 2020. С. 41–51.

[28] **Винокуров Г.Г., Стручков Н.Ф., Кычкин А.К., Лебедев М.П.** Статистическое описание формирования пористости в базальтопластиковых композиционных материалах при климатических испытаниях // Химическая технология. 2020. № 7. С. 317–324.

[29] **Startseva L.T., Panin S.V., Startsev O.V., Krotov A.S.** Moisture diffusion in glass-fiber-reinforced plastics after their climatic aging, Doklady Physical Chemistry, 456 (2014) 77–81.

[30] **Lee J.H., Rhee K.Y., Lee J.H.** Effects of moisture absorption and surface modification using 3-aminopropyltriethoxysilane on the tensile and fracture characteristics of MWCNT, Epoxy nanocomposites. Appl. Surf Sci., 256 (2010) 7658–7667.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ВАСИЛЬЕВА Елена Дмитриевна** – *младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр СО РАН», без степени.*
E-mail: vasilyeva_edm@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8953-9309

**ВАСИЛЬЕВА Алина Анатольевна** – *старший научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.Р. Ларионова СО РАН, канд. техн. наук.*
E-mail: kiir@mail.ru

**КЫЧКИН Анатолий Константинович** – *ведущий научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.Р. Ларионова СО РАН, без степени.*
E-mail: kychkinplasma@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5276-5713

## REFERENCES

[1] **A.Ye. Raskutin,** Rossiyskiye polimernyye kompozitsionnyye materialy novogo pokoleniya, ikh osvoyeniye i vnedreniye v perspektivnykh razrabatyvayemykh konstruktsiyakh // Aviatsionnyye materialy i tekhnologii. 2017. S. 349–367.

[2] **D.K. Rajak, D.D. Pagar, P.L. Menezes, E. Linul,** Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications, Polymers 11, 1667 (2019), 11 p. 37.

[3] **K.K. Kar,** Composite Materials. Processing, Application, Characterization. Springer: Berlin / Heidelberg, Germany, 2017.

[4] **Ye.A. Veshkin, V.O. Startsev, V.I. Postnov, A.A. Barannikov,** Klimaticheskiye vozdeystviya kak otsenka remontoprigodnosti izdeliy iz ugleplastika // Trudy VIAM. 2019. № 8. S. 98–108.

[5] **B. Duncan, W. Broughton,** Absorption and diffusion of moisture in polymeric materials. Measurement Good Practice Guide. National Physical Laboratory Teddington, Middlesex, UK, 2007.

[6] **P. Vaddadi, T. Nakamura, R.P. Singh,** Inverse analysis for transient moisture diffusion through fiber-reinforced composites, Acta Mater, 51 (2003) 177–193.

[7] **A.V. Nacharkina, I.V. Zelenina, M.I. Valuyeva, O.G. Voronina,** Vliyaniye appretirovaniya uglerodnogo volokna pri poluchenii obyemno-armirovannykh preform na svoystva vysokotemperaturnogo ugleplastika // Trudy VIAM. 2021. № 1. 12 s.

[8] **Ye.V. Nikolayev, V.N. Kirillov, A.A. Skirta, D.V. Grashchenkov,** Issledovaniye zakonomernostey vlagoperenosa i razrabotka standarta po opredeleniyu koeffitsiyenta diffuzii i predelnogo vlagosoderzhaniya dlya otsenki mekhanicheskikh svoystv ugleplastikov // Aviatsionnyye materialy i tekhnologii. 2013. № 3 (28) 5 s.

[9] **Y. Joliff, L. Belec, J.F. Chailan,** Modified water diffusion kinetics in an unidirectional glass/fiber composite due to the interphase area: Experimental, analytical and numerical approach, Compos. Struct. 97 (2013) 296–303.

[10] **D.A. Bond,** Moisture Diffusion in a fiber-reinforced composite: Part I. Non-Fickian transport and the effect of fiber spatial distribution, J. Compos. Mater, 39 (2004) 2113–2141.

[11] **T. Peret, A. Clement, S. Freour, F. Jacquemin,** Numerical transient hygro-elastic analyses of reinforced Fickian and non-Fickian polymers, Compos. Struct., 116 (2014) 395–403.

[12] **G. Laplante, A.V. Ouriadov, P. Lee-Sullivan, B.J. Balcom,** Anomalous moisture diffusion in an epoxy adhesive detected by magnetic resonance imaging, J. Appl. Polym. Sci., 109 (2008) 1350–1359.

[13] **H.N. Dhakal, Z.Y. Zhang, M.O.W. Richardson,** Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fiber reinforced unsaturated polyester composites, Compos. Sci. Technol., 67 (2007) 1674–1683.

[14] **H.G. Carter, K.G. Kibler,** Langmuir-Type model for anomalous moisture diffusion in composite resins, J. Compos. Mater, 12 (1978) 118–131.

[15] **G. Laplante, A.V. Ouriadov, P. Lee-Sullivan, B.J. Balcom,** Anomalous moisture diffusion in an epoxy adhesive detected by magnetic resonance imaging, J. Appl. Polym. Sci., 109 (2008) 1350–1359.

[16] **T. Peret, A. Clement, S. Freour, F. Jacquemin,** Numerical transient hygro-elastic analyses of reinforced Fickian and non-Fickian polymers, Compos. Struct., 116 (2014) 395–403.

[17] **T. Glaskova-Kuzmina, A. Zotti, A. Borriello, M. Zarrelli, A. Aniskevich,** Basalt Fibre Composite with Carbon Nanomodified Epoxy Matrix under Hydrothermal Ageing, Polymers, 13, 532 (2021). p.13.

[18] **F. Korkees, S. Alston, C. Arnold,** Directional diffusion of moisture into unidirectional carbon fiber/epoxy, Composites: Experiments and modeling, Polym. Compos., 39 (2018) 2305–2315.

[19] **E. Zile, A. Aniskevich, D. Zeleniakiene,** Anisotropic water diffusion in mechanical joints of fiber-reinforced composite panels: numerical study, J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng., 42 (490) (2020) 7 s.

[20] **V.O. Startsev, V.I. Plotnikov, Yu.V. Antipov,** Obratimye effekty vliyaniya vlagi pri opredelenii mekhanicheskikh svoystv PKM pri klimaticheskikh vozdeystviyakh // TRUDY VIAM. 2018. № 5. S. 110–118.

[21] **A.V. Gladkikh, I.S. Kurs, M.G. Kurs,** Analiz dannykh naturnykh klimaticheskikh ispytaniy, sovmeshchennykh s prilozheniyem ekspluatatsionnykh faktorov, nemetallicheskikh materialov (obzor) // Trudy VIAM. 2018. № 10. 9 s.

[22] **I.N. Gulyayev, I.V. Zelenina, Ye.O. Valevin, M.A. Khaskov,** Vliyaniye klimaticheskogo stareniya na svoystva vysokotemperaturnykh ugleplastikov // Trudy VIAM. 2021. № 2. 13 s.

[23] **S. Sethi, B.C. Ray,** Computational identification of adsorption and desorption parameters for pore scale transport in periodic porous media, Journal of Computational and Applied Mathematics, 370 (2020) 16 p.

[24] **Y. Fan, A. Gomez, S. Ferraro, B. Pinto, A. Muliana, V. La Saponara,** Diffusion of water in glass fiber reinforced polymer composites at different temperatures, Journal of Composite Materials, 53 (2019) 1097–1110.

[25] **A.V. Slavin, O.V. Startsev,** Svoystva aviatsionnykh stekloplastikov i ugleplastikov na ranney stadii klimaticheskogo vozdeystviya // Trudy VIAM. 2018. № 9. S. 71–82.

[26] **S.V. Panin, A.S. Startsev, A.S. Krotov,** Diagnostika nachalnoy stadii klimaticheskogo stareniya PKM po izmeneniyu koeffitsiyenta diffuzii vlagi // Trudy VIAM. 2014. № 7. S. 1–9.

[27] **O.V. Startsev, M.P. Lebedev, A.K. Kychkin,** Stareniye polimernykh kompozitsionnykh materialov v usloviyakh ekstremalno kholodnogo klimata // Izvestiya AltGU. Fizika. 2020. S. 41–51.

[28] **G.G. Vinokurov, N.F. Struchkov, A.K. Kychkin, M.P. Lebedev,** Statisticheskoye opisaniye formirovaniya poristosti v bazaltoplastikovykh kompozitsionnykh materialakh pri klimaticheskikh ispytaniyakh // Khimicheskaya tekhnologiya. 2020. № 7. S. 317–324.

[29] **L.T. Startseva, S.V. Panin, O.V. Startsev, A.S. Krotov,** Moisture diffusion in glass-fiber-reinforced plastics after their climatic aging, Doklady Physical Chemistry, 456 (2014) 77–81.

[30] **J.H. Lee, K.Y. Rhee, J.H. Lee,** Effects of moisture absorption and surface modification using 3-aminopropyltriethoxysilane on the tensile and fracture characteristics of MWCNT, Epoxy nanocomposites. Appl. Surf Sci., 256 (2010) 7658–7667.

## THE AUTHORS

**VASILYEVA Elena D.** – *Federal Research Centre "The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences".*
E-mail: vasilyeva_edm@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8953-9309

**VASILYEVA Alina A.** – *V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS.*
E-mail: kiir@mail.ru

**KYCHKIN Anatoliy A.** – *V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS.*
E-mail: kychkinplasma@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5276-5713

**Статья поступила в редакцию 16.06.2021; одобрена после рецензирования 28.03.2022; принята к публикации 29.03.2022.**
**The article was submitted 16.06.2021; approved after reviewing 28.03.2022; accepted for publication 29.03.2022.**

Scientific article
UDC 62
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.28103

*Bouamama Mohamed*[1] ✉ , *Elmeiche Abbes*[2],
*Belhadj Bachir*[3], *Boulenouar Mohamed El Haddaoui*[3]

[1] Mechanical Research Center (CRM), Constantine, Algeria;
[2] Laboratory of solids and structures mechanics,
Faculty of Technology University of Sidi-Bel Abbes, Sidi-Bel Abbes, Algeria;
[3] Agricultural equipment construction company C.M.A,
Sidi-Bel Abbes, Algeria

✉ bouamamamohameddoc@gmail.com

# MAINTENANCE OF DRILLING MACHINES USING PARETO ABC METHOD

*Abstract*. Under the pressure of global competition, production facilities have seen their performance grow steadily. The machines are highly demanded, the speed of rotation and the operating time increase. This results in increased damage and breakdowns, which lead to unscheduled shutdowns. The costs of downtime are in these cases significantly higher than the costs of repair and overhaul. The prevention of machine damage is therefore of great economic significance to every business. Preventive maintenance leads to ensuring the continuity of industrial production by controlling the anticipation of the consequences of faults and by ordering their repair in a timely manner so that they do not affect the functioning of rotating machines. The objective of this work is to statistically analyze failures in the machine shop with ABC method and to select the critical machine. A maintenance plan has also been drawn up for the development that addresses the major problem that is the optimized reduction in downtime of the radial drilling machine (NKH45), given the importance of this production equipment to level of manufacturing activity. This method of reliability-based maintenance (RBM).

*Keywords:* Maintenance, Radial drilling, reliability, history of interventions, Pareto ABC method.

*Citation:*

M. Bouamama, A. Elmeiche, B. Belhadj, M. El H. Boulenouar, Maintenance of drilling machines using pareto ABC method, Materials Science. Power Engineering, 28 (01) (2022) 32–42, DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.28103

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© M. Bouamama, A. Elmeiche, B. Belhadj, M. El H. Boulenouar, 2022. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Научная статья
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.28103

*М. Боуамама*[1] ✉ , *А. Елмеиче*[2],
*Б. Белхаджи*[3], *М. Ел Н. Боуленоуар*[3]

[1] Исследовательский центр механики (CRM), Константин, Алжир;
[2] Лаборатория механики твердых тел и конструкций,
Технологический факультет Университета Сиди-Бель-Аббес,
Сиди-Бель-Аббес, Алжир;
[3] Компания по производству сельскохозяйственной техники СМА,
Сиди-Бель-Аббес, Алжир

✉ bouamamamohameddoc@gmail.com

# ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ БУРОВЫХ СТАНКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ПАРЕТО ABC

*Аннотация.* Под давлением глобальной конкуренции производительность производственных мощностей неуклонно растет. Машины пользуются все большим спросом, увеличивается скорость вращения и время работы. Это приводит к повышенным повреждениям и поломкам, которые приводят к внеплановым отключениям. Затраты на простои в этих случаях значительно превышают затраты на ремонт и капитальный ремонт. Поэтому предотвращение повреждения машин имеет большое экономическое значение для любого бизнеса. Профилактическое обслуживание приводит к обеспечению непрерывности промышленного производства за счет контроля упреждения последствий неисправностей и своевременного заказа их ремонта, чтобы они не влияли на функционирование вращающихся машин. Целью данной работы является статистический анализ отказов в механическом цехе методом ABC и выбор критической машины. Также был составлен план технического обслуживания для разработки, направленный на решение основной проблемы, заключающейся в оптимизированном сокращении времени простоя радиально-сверлильного станка (HKX45), учитывая важность этого производственного оборудования для уровня производственной деятельности. Это метод технического обслуживания, основанного на надежности (RBM).

*Ключевые слова:* Техническое обслуживание, радиальное бурение, надежность, история вмешательств, метод Парето ABC.

*Для цитирования:*

Боуамама М., Елмеиче А., Белхаджи Б., Боуленоуар М. Ел Н. Техническое обслуживание буровых станков с использованием метода парето ABC // Материаловедение. Энергетика. 2022. Т. 28, № 1. С. 32–42. DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.28103

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

**Introduction.** The world of industry and transport has increasingly efficient and complex machines and installations. The rotating machine is the major element of an industrial environment. From pumps to compressors, fans, turbines, motors, and mixers, all are rotating machines working under different operating principles to ensure continuity of the production chain. Indeed, a defect in bearing, fixing or alignment can compromise production and lead to the technical and economic decline of the company. The high security requirements, the reduction of operating costs and control over equipment availability play a major role in system maintenance. It must make it possible to intervene only in the presence of defective elements, to minimize repair time, reduce raw material losses and provide a reliable and easily interpretable diagnosis despite the complexity of the equipment [1].

© Боуамама М., Елмеиче А., Белхаджи Б., Боуленоуар М. Ел Н., 2022. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

The evolution and complexity of production systems, as well as the need to produce quickly and well, have forced manufacturers to structure and organize maintenance workshops. Above all, they created new organizational concepts and new ways of intervening in production structures for manufactured products [2].

Today, upkeep has given way to maintenance. This change does not lie solely in a complete upheaval in the way of doing and conceiving of what used to be called upkeep and which is now called maintenance.

A good maintenance strategy is one that looks and focuses on preventive action to reduce intervention times and improve the life of parts [3].

The objectives of reliability-based maintenance (RBM) are [4, 5]:

– Define and justify in design the scheduled maintenance actions to be implemented;
– Define in operation the scheduled maintenance actions;
– Ensure and increase the performance of the production tool in terms of operational safety;
– Determine the recommendations relating to the techno-economic issues (investment, renovation, procedure, justification).

In different industry sectors, many reliability analysis methods have been developed separately and some more specifically for a development phase. Controlling the dependability of hydro-electro-mechanical systems requires simultaneously taking into account, the different technologies and methods of analysis on the reliability of the development cycle [6]. The Activity-based costing (ABC) Pareto method, which consists on classifying the problems in order of importance into three categories in order to treat each of them in a different way, and the Failure Mode Effect and Criticality Analysis (FMECA) used to analyze faulty hardware. This technique is considered the most rigorous due to detailed research into the causes of failures.

## Methodology

Our study will focus on a subsystem of the machine, under the recommendations made by the maintenance department at the agricultural equipment construction company a decision support tool is used which is the Activity-based costing (ABC) Pareto method and the Failure Mode Effect and Criticality Analysis (FMECA) method. These methods allow the identification of the main causes of functional equipment failures and the classification of these failures in order to establish an optimal maintenance action plan to minimize downtime, which penalizes production.

***Principle of the ABC method***

The ABC method is an objective means of analysis, it allows classify the elements, which represent the most important fraction of the studied characteristic, by indicating the percentages for a determined characteristic. The ABC method provides an answer. It allows the investigation that highlights the most important elements of a problem in order to facilitate choices and priorities [7]. Events (failures for example) are classified in decreasing order of costs (downtime, financial cost, number, etc.), each event relating to an entity. A graph is then drawn up corresponding to the percentages of cumulative costs to the percentages of types of failures or cumulative percentages of failures [8]. In the diagram (Fig. 1), there are three zones.

1. Zone A: 20% of breakdowns causing 80% of costs;
2. Zone B: the 30% additional breakdowns only cost 15% more;
3. Zone C: the remaining 50% of breakdowns concern only 5% of the overall cost.

It is obvious that the preparation of the maintenance work must relate to the breakdowns of zone A.

***Principles of the Failure Mode Effects and Criticality Analysis (FMECA)***

The Failure Mode Effect and Criticality Analysis (FMECA) is an a priori inductive risk prevention method that aims to identify the potential failures of a system. As it was developed in the 1940s by the American army, then implemented in the sectors industries, aeronautics and nuclear power, in France and in other European countries after 1970 [9–11]. This method can be applied to a product, a process or a means of production.

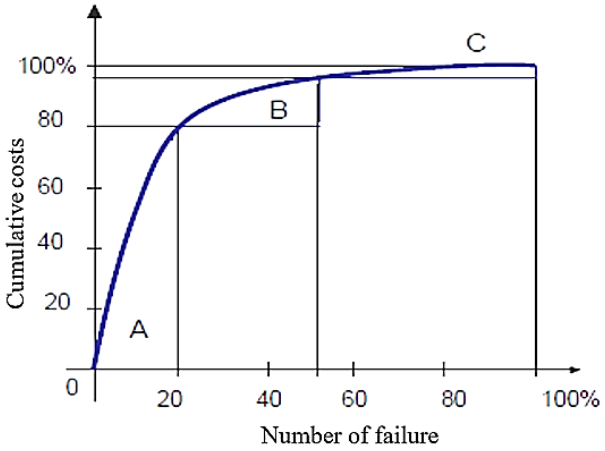


Fig. 1. Pareto diagram or ABC curve

Today, the FMECA method has been applied in the following industrial fields: space, armaments, mechanics, electronics, electrical engineering, automotive, nuclear, aeronautics, chemistry etc. Failures are analyzed to specify their criticality, identify the main causes and ultimately, define appropriate risk reduction actions [12].

*Objectives of criticality in FMECA*

• Evaluate the effects and consequence of events caused by each known mode of component failure regardless of the origin at the various functional levels of the system.

• Determine the importance or criticality of each failure mode taking into account its influence on the normal operation of the system or on its level of performance and assess the impact on the reliability or on the safety of the process considered.

• Classify the known failure modes according to the ease, with which they can be detected, diagnosed, simulated, change a component, and according to the means implemented to deal with them and keep the system in working order (repair, maintenance and logistics, etc.) as well as any other relevant characteristic.

• Establish the scales of significance and probability of failure, provided the necessary information is available [13, 14].

There are several types of the Failure Mode Effects and Criticality Analysis (FMECA). Among the used are: Products FMECA, organization FMECA, processes FMECA, resources FMECA, service FMECA, and Security FMECA [15].

**Case study and Results**

The designers in his definition drawing carry out machining for giving the blank part, the shape, required dimensions and the necessary precision, by chip removal on suitable machine tools [16].

A drilling machine is used to drill or tap holes in various materials with drill bits. Modern drills are the culmination of centuries of technology.

The radial drill (NKH 45) is the most used in the machining workshop of the agricultural machinery complex of the CMA company in Sidi Bel Abbés (Algeria).

The radial drilling machine (NKH 45) is the most used in the machining workshop of the agricultural machinery complex of the CMA company in Sidi Bel Abbes (Algeria) because of its superior characteristics and its versatility.

The radial drill (NKH 45) machine is used in most maintenance work and especially for large parts, which. After positioning remains fixed, the tool spindle is moved from one machining axis to another. Table 1 shows main characteristics and machining Ability of this machine.

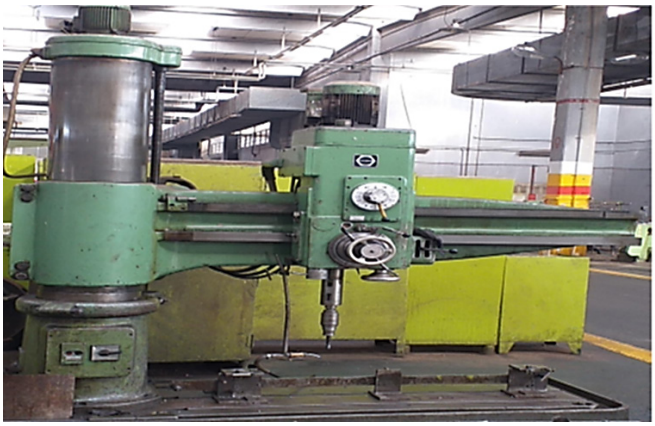

Fig. 2. Radial drilling machine (NKH 45)

Table 1

**Characteristics and machining capabilities of the NKH45 radial drill**

| Machining characteristic / capabilities | Value | Unit |
|---|---|---|
| Motor | 7 | KW |
| Spindle speed direction reversible | 1500–3000 | Tr/min |
| Advances | 0.12–1.25 | mm/t |
| Column diameter | 350 | Mm |
| Top column | 2800 | Mm |
| Drill axis distance | 325 minimums | // |
| Pinout and column | 1600 maximums | // |
| Spindle distance (chuck) | 0 minimum | mm |
| Table | 900 maximums | mm |
| Spindle-base distance | 375 minimum | mm |

***History of interventions on the drills of the workshop machining***

The following table presents the number of heavy curative interventions in 2021.

According to Fig. 3 which represents the history of the interventions and the results of the analysis by the method (ABC) for one year:

**Zone A**

It can be seen that the number of shutdowns / years on radial drills (5.4.3.7.10.1.6.) present (80%) of the shutdowns, in other words (80%) of the maintenance costs.

So this is the priority zone determine us to study in more detail the failures on its equipment, and then make the right decisions.

**Zone B**

Shutdowns on multi-spindle machines (9.12.13.) represent 5% of the total number of shutdowns for workshop equipment (drilling section). This machine requires little maintenance. From the intervention history and method analysis results (ABC) for one year.

**Zone C**

Stoppages of multi-spindle machines (9.12.13.) represent only 5% of the total number of stoppages of workshop equipment (drilling section).

The majority of failures are found on radial drills (.5.4.3.7.10.1 and 6).

– For these machines, a failure analysis study is necessary.

Fig. 3. The interventions on the drills of the machining workshop by the ABC method

– We prioritized the FMECA study for a subsystem of the machine (N°003505), serial number (n°5), because we noted that 70% of the failures are based on the electro-hydraulic circuit part, while the rest are mechanical s-system, engine, and cooling circuit.

Moreover, we used the ABC method aid tool in order to select the subsystem to be supported.

Table 2

**Cumulative number of shutdowns / years**

| Machine no. | Order no. | Number of critical shutdowns / years (ABC) | Cumulative number of Shutdowns / years | % cumulative number of shutdowns / years |
|---|---|---|---|---|
| 003505 | 5 | 214 | 214 | 15 |
| 003504 | 4 | 192 | 406 | 29 |
| 003503 | 3 | 180 | 586 | 43 |
| 003702 | 7 | 175 | 761 | 56 |
| 003706 | 10 | 153 | 914 | 67 |
| 003501 | 1 | 111 | 1025 | 75 |
| 003701 | 6 | 80 | 1105 | 81 |
| 003704 | 8 | 75 | 1180 | 86 |
| 003103 | 11 | 66 | 1246 | 91 |
| 003502 | 2 | 49 | 1295 | 95 |
| 003104 | 12 | 31 | 1326 | 97 |
| 003506 | 13 | 20 | 1346 | 99 |
| 003705 | 9 | 11 | 1357 | 100 |

***Statistics of the nature of interventions on the radial drill machine n ° (003505)***

In Table 3, we find the nature of the curative maintenance intervention carried out on the machine during one year.

Table 3 shows the results of the nature of corrective maintenance intervention. From these results, we make an analysis on these interventions by the ABC method.

Table 3

**Nature of interventions on the machine n° (003505)**

| Voucher reference | Order No. | Number of shutdowns / hour | Type of intervention (failure) |
|---|---|---|---|
| 11130313 | 1 | 3 | Mechanical |
| 11130365 | 2 | 5 | Electrical |
| 11130455 | 3 | 2 | Mechanical |
| 11130688 | 4 | 1 | Cooling circuit |
| 11130804 | 5 | 24 | Electrical / Hydraulic |
| 11130865 | 6 | 6 | Mechanical |
| 11130574 | 7 | 4 | Mechanical |
| 11120349 | 8 | 2 | Cooling motor |
| 11120412 | 9 | 48 | Electrical / Hydraulic |
| 11120484 | 10 | 5 | Mechanical |
| 11110038 | 11 | 42 | Electrical |
| 11110051 | 12 | 14 | Hydraulic |
| 11110080 | 13 | 8 | Mechanical |
| 11110359 | 14 | 7 | Mechanical |
| 11110459 | 15 | 3 | Cooling circuit |
| 11110505 | 16 | 40 | Hydraulic |

Table 4

**Number of shutdowns / cumulative hour of the radial drill n° (003505)**

| Order No. | Number of shutdowns / hour | Accumulated number of shutdowns / hour | % Accumulated number of shutdowns / hour |
|---|---|---|---|
| 09 | 48 | 48 | 22 |
| 11 | 42 | 90 | 42 |
| 16 | 40 | 130 | 61 |
| 05 | 24 | 154 | 72 |
| 12 | 14 | 168 | 78 |
| 13 | 08 | 176 | 82 |
| 14 | 07 | 183 | 85 |
| 06 | 06 | 189 | 88 |
| 02 | 05 | 194 | 90 |
| 10 | 05 | 193 | 93 |
| 07 | 04 | 203 | 95 |
| 15 | 03 | 206 | 96 |
| 01 | 03 | 209 | 97 |
| 08 | 02 | 211 | 98 |
| 03 | 02 | 213 | 99 |
| 04 | 01 | 214 | 100 |

According to Fig. 4, which represents the history of the interventions and the results of the analysis by the method (ABC) of the radial drill machine n° (003505):

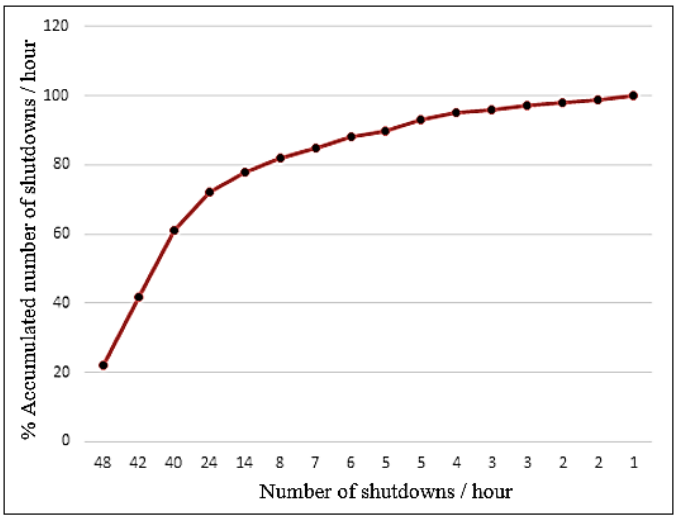


Fig. 4. Presentation of the interventions of the radial drill machine n° (003505) by the Pareto ABC method

**Zone A**

It can be seen that the number of shutdowns / hour of the electro-hydraulic box (9.11.16.5.12.) It accounts for 80% of the interventions, or in other words it represents 80% of the maintenance costs. This is therefore the priority zone, they challenge us to study in more detail the failures on this machine subsystem, and then make the right decisions.

**Zone B**

This zone amounts to 15% of the number of shutdowns / hour of mechanical nature (.13.14.6.2.10.7), we will be less demanding to maintain this subsystem.

**Zone C**

The number of shutdowns / hour for the rest (15.1.8.3.4.) Represents only 5% of the total number of interventions on the machine, i.e. the cooling subsystem. the cooling sub-system. This equipment requires little maintenance.

## Conclusion

The work carried out allowed us first to be acquainted with the industry, the environment of work and the various aspects that they can reveal. The progress of the project giving us the opportunity to discover the true purpose of the maintenance process. This work also allowed us to using a preventive maintenance plan for the radial drill and to define spare parts as well as the frequency of preventive actions.

The work carried out allowed us first of all to familiarize ourselves with the world of industry, the working world.

The following conclusions could be highlighted:

– The majority of failures on radial drilling machines (5.4.3.7.10.1 and 6.); for these machines it is necessary to carry out a failure analysis study;

– For the machine n° 003505 we noted that 70% of the failures based on the electro-hydraulic circuit part, and the rest, mechanical s-system, engine, and cooling circuit.

The problem posed in our work is that the T.R.T (Technical Repair Time) is high, due to the lack of diagnostic averages.

To this end, we propose to carry diagnostic and analysis methods on the electro-hydraulic subsystem to facilitate the diagnosis and to reduce the Technical Repair Time (T.R.T).

## REFERENCES

[1] **S. Kass,** (2019). Diagnostic vibratoire autonome des roulements (Doctoral dissertation, Université de Lyon; Université libanaise).

[2] **H. Lightfoot, T. Baines, P. Smart,** (2013). "The servitization of manufacturing: A systematic literature review of interdependent trends", International Journal of Operations & Production Management, Vol. 33. No. 11/12, pp. 1408–1434. https://doi.org/10.1108/IJOPM-07-2010-0196

[3] R.S. Velmurugan, T. Dhingra, (2015). "Maintenance strategy selection and its impact in maintenance function: A conceptual framework", International Journal of Operations & Production Management, Vol. 35. No. 12, pp. 1622–1661. https://doi.org/10.1108/IJOPM-01-2014-0028

[4] **S. Zirmi,** (2010). Conception de montages d'usinage modulaire pour le fraisage (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG).

[5] **F.I. Khan, M.M. Haddara,** (2003). Risk-based maintenance (RBM): a quantitative approach for maintenance/inspection scheduling and planning. Journal of loss prevention in the process industries, 16(6), 561–573.

[6] **A.G. Mihalache,** (2007). Modélisation et évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques: application sur système embarqué (Doctoral dissertation, Université d'Angers).

[7] **G.M. Kvon, I.V. Lushchik, Y.V. Nikolaeva, Y.V. Nuretdinova, R.S. Azitov, A.A. Pavlushin,** (2018). ABC-analysis technique of regional industrial investment development: theoretical and practical aspect. Revista ESPACIOS, 39 (22), 14.

[8] **Y. Mebbani,** (2009). Intérêt de la mise en œuvre de la méthode ABC (Activity Based Costing) dans une entreprise Algérienne: Cas de la société GAO-ORAVIO unité d'aliment de bétail UAB Mostaganem (Doctoral dissertation, Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed).

[9] **M. OumhanI, S. Mechta,** (2020). Amélioration du rendement d'un système électromécanique par l'utilisation des méthodes de maintenance industrielle (Doctoral dissertation, Univ M'sila).

[10] **B. Quelennec, Beretz, Laurence & Guillot, Marcel & Collange, Olivier & Pottecher, Julien & B. Gourieux,** (2013). Analyse des modes de défaillance et de la criticité de l'administration des médicaments injectables en réanimation.

[11] **C. Meyrieux, R. Garcia, N. Pourel, A. Mège, V. Bodez,** (2012). Analyse des risques a priori du processus de prise en charge des patients en radiothérapie: exemple d'utilisation de la méthode Amdec. Cancer/Radiothérapie, 16 (7), 613–618.

[12] **E.F. Martins, G.B. Lima, A.P. Sant'anna, R.A.D. Fonseca, P.M.D. Silva, L.O. Gavião,** (2017). Stochastic Risk Analysis: Monte Carlo Simulation and FMEA. Revista Espacios, 38 (04).

[13] **R. Ahmad, S. Kamaruddin, I.A. Azid, I.P. Almanar,** (2012). Failure analysis of machinery component by considering external factors and multiple failure modes – a case study in the processing industry. Engineering Failure Analysis, 25, 182–192.

[14] **L. Sedrata, C.E. Ferrah,** (2021). Etude Et MaintenancE d'un Systeme Solaire Photovoltaïque (Doctoral dissertation, university of M'sila).

[15] **B. Belhadj, M.E.H. Boulenouar,** (2020). A.M.D.E.C Machine (Boite électro-hydraulique d'une perceuse radiale), Master professionnel en Management de production et de la maintenance industrielle 2éme promotion, Institut national de la productivité et de développement industriel, Algérie.

[16] **I. Verzea, M. Gabriel, D. Richet,** (1999). Mbf globale: une étape stratégique vers la tpm. Revue Française de Gestion Industrielle, 18 (2).

## THE AUTHORS

**BOUAMAMA Mohamed** – *Mechanics Research Center (CRM).*
E-mail: bouamamamohameddoc@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1804-9091

**ELMEICHE Abbes** – *Laboratory of solids and structures mechanics, Faculty of Technology University of Sidi-Bel Abbes.*
E-mail: abbes.elmeiche@univ-sba.dz

**BELHADJ Bachir** – *Agricultural equipment construction company C.M.A.*
E-mail: belhadjbachir248@ gmail.com

**BOULENOUAR Mohamed El Haddaoui** – *Agricultural equipment construction company C.M.A.*
E-mail: boulenouar2008@hotmail.com

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Kass S.** (2019). Diagnostic vibratoire autonome des roulements (Doctoral dissertation, Université de Lyon; Université libanaise).

[2] **Lightfoot H., Baines T., Smart P.** (2013), "The servitization of manufacturing: A systematic literature review of interdependent trends", International Journal of Operations & Production Management, Vol. 33. No. 11/12, pp. 1408–1434. https://doi.org/10.1108/IJOPM-07-2010-0196

[3] **Velmurugan R.S., Dhingra T.** (2015), "Maintenance strategy selection and its impact in maintenance function: A conceptual framework", International Journal of Operations & Production Management, Vol. 35. No. 12, pp. 1622–1661. https://doi.org/10.1108/IJOPM-01-2014-0028

[4] **Zirmi S.** (2010). Conception de montages d'usinage modulaire pour le fraisage (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG).

[5] **Khan F.I., Haddara M.M.** (2003). Risk-based maintenance (RBM): a quantitative approach for maintenance/inspection scheduling and planning. Journal of loss prevention in the process industries, 16 (6), 561–573.

[6] **Mihalache A.G.** (2007). Modélisation et évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques: application sur système embarqué (Doctoral dissertation, Université d'Angers).

[7] **Kvon G.M., Lushchik I.V., Nikolaeva Y.V., Nuretdinova Y.V., Azitov R.S., Pavlushin A.A.** (2018). ABC-analysis technique of regional industrial investment development: theoretical and practical aspect. Revista ESPACIOS, 39 (22), 14.

[8] **Mebbani Y.** (2009). Intérêt de la mise en œuvre de la méthode ABC (Activity Based Costing) dans une entreprise Algérienne: Cas de la société GAO-ORAVIO unité d'aliment de bétail UAB Mostaganem (Doctoral dissertation, Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed).

[9] **Oumhani M., Mechta S.** (2020). Amélioration du rendement d'un système électromécanique par l'utilisation des méthodes de maintenance industrielle (Doctoral dissertation, Univ M'sila).

[10] **Quelennec B., Beretz, Laurence & Guillot, Marcel & Collange, Olivier & Pottecher, Julien & Gourieux B.** (2013). Analyse des modes de défaillance et de la criticité de l'administration des médicaments injectables en réanimation.

[11] **Meyrieux C., Garcia R., Pourel N., Mège A., Bodez V.** (2012). Analyse des risques a priori du processus de prise en charge des patients en radiothérapie: exemple d'utilisation de la méthode Amdec. Cancer/Radiothérapie, 16 (7), 613–618.

[12] **Martins E.F., Lima G.B., Sant'anna A.P., Fonseca R.A.D., Silva P.M.D., Gavião L.O.** (2017). Stochastic Risk Analysis: Monte Carlo Simulation and FMEA. Revista Espacios, 38 (04).

[13] **Ahmad R., Kamaruddin S., Azid I.A., Almanar I.P.** (2012). Failure analysis of machinery component by considering external factors and multiple failure modes – a case study in the processing industry. Engineering Failure Analysis, 25, 182–192.

[14] **Sedrata L., Ferrah C.E.** (2021). Etude Et Maintenance d'un Systeme Solaire Photovoltaïque (Doctoral dissertation, university of M'sila).

[15] **Belhadj B., Boulenouar M.E.H.** (2020). A.M.D.E.C Machine (Boite électro-hydraulique d'une perceuse radiale), Master professionnel en Management de production et de la maintenance industrielle 2éme promotion, Institut national de la productivité et de développement industriel, Algérie.

[16] **Verzea I., Gabriel M., Richet D.** (1999). Mbf globale: une étape stratégique vers la tpm. Revue Française de Gestion Industrielle, 18 (2).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**БОУАМАМА М.** – *Исследовательский центр механики (CRM).*
E-mail: bouamamamohameddoc@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1804-9091

**ЕЛМЕИЧЕ А.** – *Лаборатория механики твердых тел и конструкций, Технологический факультет Университета Сиди-Бель-Аббес.*
E-mail: abbes.elmeiche@univ-sba.dz

**БЕЛХАДЖИ Б.** – *Компания по производству сельскохозяйственной техники CMA.*
E-mail: belhadjbachir248@ gmail.com

**БОУЛЕНОУАР М. Ел Н.** – *Компания по производству сельскохозяйственной техники CMA.*
E-mail: boulenouar2008@hotmail.com

**The article was submitted 03.01.2021; approved after reviewing 14.02.2022; accepted for publication 24.02.2022.**
**Статья поступила в редакцию 03.01.2021; одобрена после рецензирования 14.02.2022; принята к публикации 24.02.2022.**

Научная статья
УДК 621.791:681.5.01:669.17
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.28104

*Ю.А. Соколов* ✉

ПАО "Электромеханика", г. Ржев, Тверская область, Россия

✉ s5577@inbox.ru

# АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ СИСТЕМА АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКИ В КОНТРОЛИРУЕМОЙ АТМОСФЕРЕ

*Аннотация.* Показана возможность создания современной системы управления, связывающей в единое информационное пространство промышленный компьютер, устройство ЧПУ, программируемый контроллер, цифровые и аналоговые средства измерения, что обеспечивает получение сварного соединения с заданной структурой и свойствами. Предложен принцип для создания единой цифровой платформы, объединяющей области проектирования и численных расчётов на основе объектно-ориентированного подхода, обеспечивающего поддержку системно-инженерных процессов, начиная с концептуального дизайна и до поздних стадий жизненного цикла системы. Интеграция технологических, проектных, расчетных и эксплуатационных процессов на базе CASE-технологии позволяет максимально автоматизировать процесс разработки, обеспечивает отсутствие ошибок и простоту в обслуживании программных продуктов. Микропроцессорные устройства и локальные вычислительные сети предоставляют возможность создания целостных технологических систем обработки данных.

*Ключевые слова:* сварка, автоматизация производства, объектно-ориентированный подход, структура сплавов, свойства сплавов.

*Для цитирования:*

Соколов Ю.А. Автоматизированная производственная система аргонодуговой сварки в контролируемой атмосфере // Материаловедение. Энергетика. 2022. Т. 28, № 1. С. 43–66. DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.28104

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Соколов Ю.А., 2022. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Scientific article
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.28104

*Y.A. Sokolov* ✉

Public Joint Stock Company "Electromekhanika",
Rzhev city, Tver region, Russia

✉ s5577@inbox.ru

# AUTOMATED PRODUCTION SYSTEM OF ARGON ARC WELDING IN A CONTROLLED ATMOSPHERE

*Abstract*. The paper shows the possibility of creating a modern control system linking an industrial computer, a CNC device, a programmable controller, digital and analog measuring instruments into a single information space, which ensures the production of a welded joint with a required structure and properties. A principle is proposed for creating a single digital platform combining the fields of design and numerical calculations based on an object-oriented approach that provides support for system engineering processes, starting with conceptual design and up to the later stages of the system lifecycle. Integration of technological, design, calculation and operational processes based on CASE technology allows you to automate the development process as much as possible ensuring the absence of errors and ease of software products maintenance. Microprocessor devices and local area networks provide an opportunity to create integrated technological data processing systems.

*Keywords:* welding, production automation, object-oriented approach, structure of alloys, properties of materials.

*Citation:*

Y.A. Sokolov, Automated production system of argon arc welding in a controlled atmosphere, Materials Science. Power Engineering, 28 (01) (2022) 43–66, DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.28104

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

**Введение.** Изменение подхода к организации производства в рамках таких концепций как Industry 4.0, Smart Manufacturing, Manufacturing Cloud, Society 5.0 заключается в интеграции производственных и информационных технологий; создании информационной модели ПС, прогнозирующей поведение реального объекта с высокой степенью точности на всех этапах жизненного цикла, включая этап эксплуатации [1–2].

Одним из ведущих технологических процессов обработки металлов и сплавов является сварка. Сварка применяется при производстве судов, турбин, котлов, самолетов, мостов, реакторов и других необходимых современных объектов различного назначения является [3–6]. Для обеспечения качества и, соответственно, высокой работоспособности сварных соединений необходим отлаженный и хорошо контролируемый производственный процесс. Сварочное производство, включающее систему технологической подготовки, совокупность основного и вспомогательного оборудования, технологический процесс (ТП), конечный продукт, можно рассматривать как сложную иерархическую производственную систему (ПС). К ее характерным особенностям относятся: многокритериальность оценок процессов, различная природа информационных связей между подсистемами и элементами; многообразие различных форм связей.

© Y.A. Sokolov, 2022. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Теория иерархических систем облегчает раскрытие внутренних закономерностей сложной системы, позволяет выявить различные способы её декомпозиции в виде иерархий абстрагирования [7–8]. Для каждого уровня абстрагирования (страты) характерны сосредоточение внимания на специфических аспектах производства (технологическом, техническом, алгоритмическом, информационным, измерительном, организационном), оригинальный язык, семейство моделей, законы и принципы, позволяющих детально раскрыть взаимодействие элементов производственной системы в пределах и вне страты.

Целью настоящей работы является создание иерархической абстракции, состоящей из технологической, инструментальной, измерительной, информационной, алгоритмической, системной страт и позволяющей раскрыть содержание производственной системы сварки.

**Методология стратифицированного описания сварочного процесса**

Стратифицированное описание производственной системы аргонодуговой сварки (АДС), включающее семейство моделей на каждом абстрактном уровне (системном, алгоритмическом, информационном, измерительном, инструментальном и технологическом), представлено на рис. 1.

**Технологическая страта**

В процессе АДС происходит взаимодействие гидродинамического, температурного, электромагнитного поля, поля упругих напряжений. Формирование сварочной ванны осуществляется за счёт тепла, которое выделяется в электрической дуге между неплавящимся вольфрамовым электродом и изделием. В начальный момент времени для преодоления поверхностного потенциального барьера к электроду и изделию подводится импульс высокого напряжения от осциллятора, что приводит к эмиссии электронов с вольфрамового катода, ионизации атомов инертного газа, образованию плазмы и возникновению дуги. При прохождении тока по вольфрамовому электроду он нагревается до высокой температуры, обеспечивая в дальнейшем термоэлектронную эмиссию. Скорость электронов определяется по формуле [9]:

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}},$$

где $m$ – масса электрона ($9{,}1 \cdot 10^{-28}$ г); $v$ – скорость электрона, км/с; $e$ – заряд электрона ($1{,}6 \cdot 10^{-12}$ эрг); $U$ – разность потенциалов на участке пути, пройденном электроном, В.

Электроны со скоростью v перемещаются от катода, ионизируют газ, создавая электрическую дугу, состоящую из электронов, положительных и отрицательных ионов, нейтральных атомов. Электрическая дуга имеет несколько областей: катодный электронный слой, плазменный шнур, анодный электронный слой. Устойчивость электрической дуги зависит от количества ионизированных элементарных частиц в её столбе.

Взаимодействие электрической дуги с изделием приводит к формированию сварочной ванны, состояние металла в которой определяется совокупностью физических процессов (рис. 2), протекающих на различных пространственных и временных масштабах. Глубина проплавления и форма сварочной ванны определяются концентрацией вводимой в область сварки энергией. Кристаллизация материала протекает в условиях больших градиентов температуры, напряжений и деформаций.

Потери тепла на поверхности материала определяются конвективным, радиационным и кондуктивным теплообменом, а также испарением металла с поверхности расплава при высокой интенсивности теплового источника. В материале изделия наблюдаются три характерные области. В первой области имеет место плавление и затвердевание металла. Вторая область

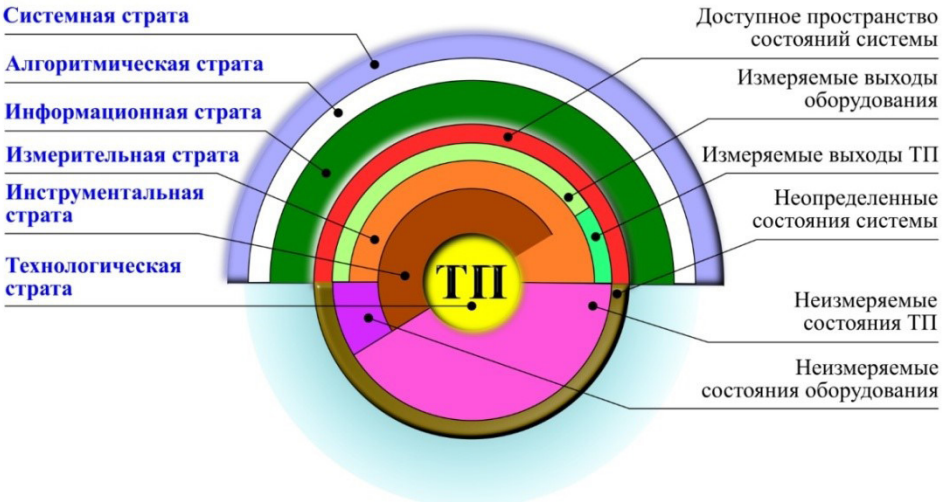


Рис. 1. Стратифицированное представление производственной системы

Fig. 1. Stratified representation of the production system

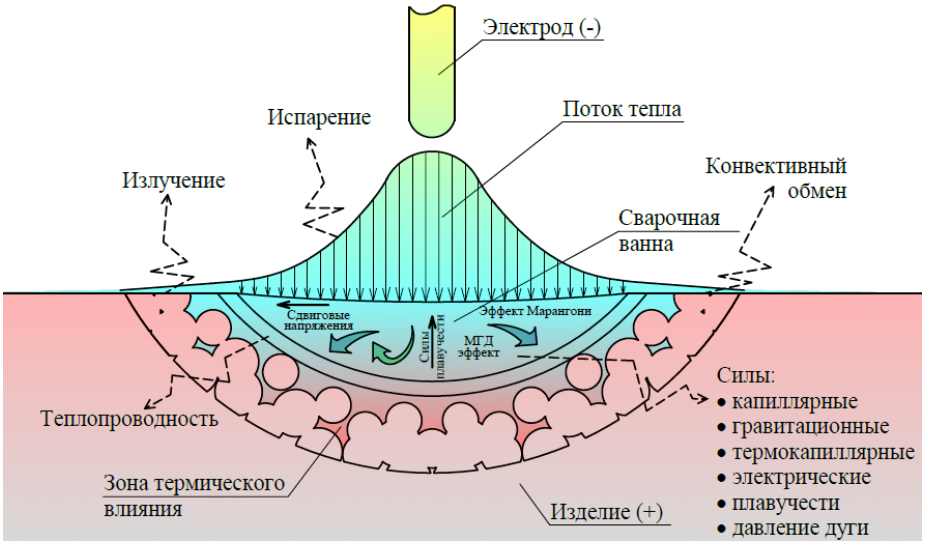


Рис. 2. Физические процессы, происходящие при сварке

Fig. 2. Physical processes occurring during welding

характеризуется тем, что она подвержена действию источника тепла, но материал остается в твердом состоянии. В ней наблюдается рост зерен, рекристаллизация. В третьей области, представляющей собой основной металл, сохраняется исходная микроструктура материала. Также имеет место промежуточная узкая зона, в которой металл является частично проплавленным (температура изменяется в интервале между температурой солидуса и температурой ликвидуса). Для описания процессов в этой области применяется теория переноса в пористых средах [10]. Состояние металла в ванне расплава определяется силами плавучести, электромагнитными силами, силами поверхностного натяжения, давлением дуги. Конвективный теплообмен и течение металла в зоне расплава оказывают влияние на состояние материала в первой и второй областях, а также размер этих областей и их форму [11]. Неравномерное распределение температуры в сварочной ванне и градиент температуры между осью и периферийной областью

приводят к возникновению естественной конвекции. На форму сварочной ванны оказывает влияние давление дуги [12–15].

Плотность металла уменьшается с увеличением температуры. Поскольку источники тепла сосредоточены в центре поверхности сварочной ванны, в центре сварочной ванны температура жидкого металла выше, чем по краям. Гравитация вызывает движение более тяжелой жидкости с краев ванны вглубь ванны, следовательно, жидкий металл тонет вдоль границ ванны и поднимается вдоль оси ванны. Скрытая теплота выделяется или поглощается, когда материал претерпевает фазовые изменения.

Линии тока концентрируются вблизи центра сварочной ванны (анодного пятна) и направлены от катода к изделию. Жидкий металл проталкивается вниз по центру ванны и поднимается вдоль краев сварочной ванны, образуя вихрь, направленный против часовой стрелки. Чем меньше размер анодного пятна, тем плотнее линии тока, и, следовательно, тем больше сила Лоренца, действующая вниз на жидкий металл. Напряжение сдвига вызвано градиентом поверхностного натяжения в отсутствие поверхностно-активного вещества. Жидкий металл с более низким поверхностным натяжением движется в радиальном направлении от центра сварочной ванны к краям с более высоким поверхностным натяжением. Внешнее напряжение сдвига индуцируется на поверхности ванны градиентом поверхностного натяжения.

Управление процессом сварки характеризуется совокупностью параметров, которые условно можно разделить на три группы (рис. 3) [16]:

1. энергетические, определяющие вклад энергии в процесс образования сварного соединения, ток и напряжение дуги, температурное поле T (x, y, z, t);

2. кинематические, характеризующие пространственное перемещение или положение сварочной головки относительно изделия (скорость сварки, скорость подачи присадочной проволоки, амплитуда и частота вибраций электрода относительно стыка);

3. технологические, определяющие условия формирования и кристаллизации сварного шва (диаметр электрода, форма и размеры разделки, зазор между свариваемыми изделиями, положение шва в пространстве и др.).

Энергетические и кинематические параметры главным образом определяются выбранным процессом сварки и физическими свойствами материала. Качество сварного соединения в значительной степени определяется технологическими параметрами процесса АДС:

– задержка на включение перемещения электрода,
– режим подачи присадочной проволоки (непрерывный, импульсный),
– задержка на включение присадочной проволоки,
– задержка на включение колебаний электрода,
– ток дуги,
– напряжение дуги,
– режим работы источника питания (непрерывный, импульсный, постоянный, переменный),
– ток паузы,
– ток импульса,
– время нарастания импульса,
– время спада импульса,
– время паузы,
– время импульса,
– скорость сварки,
– скорость подачи присадочной проволоки,
– диаметр присадочной проволоки,
– амплитуда колебаний электрода,
– период колебаний электрода.

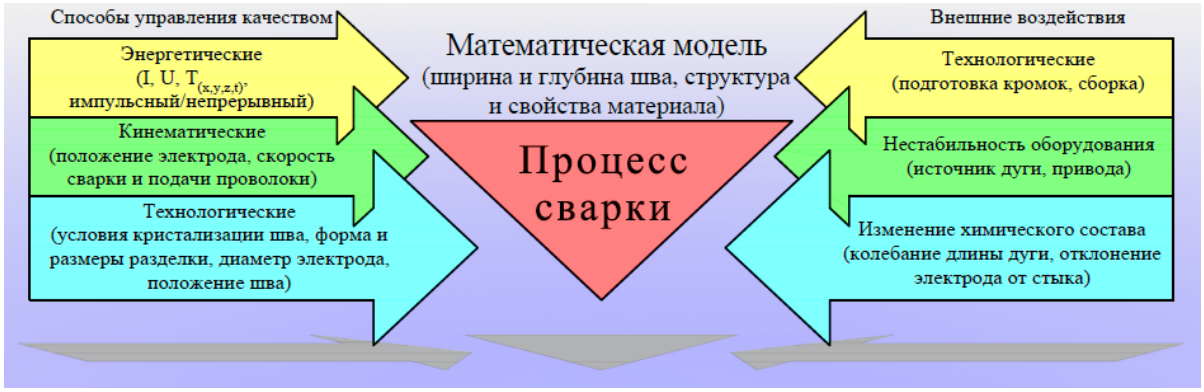


Рис. 3. Способы управления качеством сварного соединения

Fig. 3. Ways to manage the quality of the welded joint

Выбор способа управления определяется типом сварного соединения, формой разделки, пространственным положением шва и особенностями технологии сварки. К параметрам нестационарных (импульсных) процессов относятся амплитуда колебаний горелки, скорость колебаний, время задержки горелки вдоль и поперек стыка, шаг перемещения горелки, шаг (импульс) и скорость подачи присадочной проволоки.

**Инструментальная страта**

На инструментальной страте рассматривается техническое обеспечение для выполнения технологического процесса АДС в контролируемой атмосфере. Элементами подсистемы, соответствующей инструментальной страте, являются единицы специализированного оборудования для реализации АДС в контролируемой атмосфере. На этом этапе определяются наиболее существенные технологические параметры сварки и состав технических средств, взаимодействия между ними.

Проектирование установки для реализации технологии АДС в контролируемой атмосфере, как правило, осуществляется при помощи специальных инструментов: пакетов автоматизированного проектирования и инженерных расчётов, объектно-ориентированных языков моделирования. Объектно-ориентированный подход к проектированию подразумевает рассмотрение установки в виде совокупности объектов, взаимодействующих друг с другом и подчиненных общей цели функционирования. Выделяя совокупность объектов и отношений между ними, можно построить объектную модель установки и на её основе разработать программные средства.

Одним из инструментов для проектирования сварочного оборудования является унифицированный язык моделирования UML (Unified Modelling Language), разработанный на базе методов Буча, Якобсона (Object-Oriented Software Engineering, OOSE) и Рамбо (Object Modeling Technique, OMT). UML, словарь и правила которого сосредоточены на концептуальном и физическом представлении системы, включает в себя средства для визуализации моделей, конструирования, документирования артефактов программных систем [17–18].

Средства UML позволяют построить множество диаграмм для концентрации внимания на различных аспектах сварочного оборудования. К основным способам использования UML для моделирования относятся: разработка диаграмм (графическое представление информации о моделируемой системе), обмен информацией (взаимопонимание всех специалистов, участвующих в проекте), спецификация систем (построение адекватных моделей с учётом специфических особенностей системы), генерация кода (формирование кода на языке программирования из модели), имитационное моделирование (построение моделей для получения информации об исследуемом объекте методом вычислительных экспериментов), верификация модели (проверка адекватности моделей, степени их соответствия исследуемому оригиналу) [19].

Для описания технологии АДС в контролируемой атмосфере, оборудования и управления технологическим процессом с различных точек зрения обычно используют три основные типа моделей: классов, состояний и взаимодействий.

***Модель классов*** описывает группу объектов с одинаковыми атрибутами, операциями, типами отношений и семантикой. Некоторые объекты существуют в реальном мире (исходные материалы, оборудование, изделие и др.), другие являются сугубо концептуальными сущностями (алгоритмы, методики оптимизации и пр.). Модель классов описывает объекты, входящие в состав ПС, и отношения между ними, модель состояний – изменяющиеся со временем аспекты объектов, модель взаимодействий – взаимодействия между объектами [20]. Диаграмма классов, основной способ описания структуры установки, показывает набор классов, интерфейсов и коопераций, а также их связи. Основными формами для выражения самых важных частей семантики классов являются имя, атрибуты, операции и обязанности. Модель классов создает контекст для моделей состояний и взаимодействия.

***Модель состояний*** описывает состояния, в которых может находиться объект, свойства объекта и действующие на них ограничения, а также события, вызывающие переход объекта из одного состояния в другое. Для их описания достаточно списка операций [20]. Сначала выявляются классы, которые могут находиться в разных состояниях, и производится запись состояния для каждого класса. Затем необходимо определить события, вызывающие переход каждого объекта из одного состояния в другое. Зная состояния и события, можно построить диаграмму состояний для каждого из объектов.

Например, класс «технологический процесс» может находиться в разных состояниях, для описания которых необходим список операций и переходов. Процесс АДС включает в себя выполнение следующих технологических операций и переходов: получение предварительного разрежения в рабочей камере, создание контролируемой инертной среды в рабочей камере, установка электрода на стык, зажигание дуги, взаимосвязанное перемещение электрода и изделия, включение режима слежения за длиной дуги, подача присадочной проволоки в соответствии с заданным контуром, включение механизма колебаний электрода (при многопроходной сварке с разделкой кромок), заварка кратера, напуск атмосферы и др. (рис. 4).

***Модель взаимодействия*** описывает взаимодействие между объектами, т.е. кооперацию объектов, для обеспечения необходимого поведения системы как целого. Построение модели взаимодействия начинается с выбора варианта использования, который затем уточняется на диаграммах последовательности и диаграммах деятельности. Процесс АДС состоит из отдельных, но взаимосвязанных определенной последовательностью элементов, используя которые можно спроектировать специализированное оборудование различной сложности (рис. 5).

Диаграммы последовательностей показывает временную последовательность взаимодействия объектов, диаграммы деятельности - иллюстрируют поток управления между последовательными этапами вычислений. Модели взаимодействия строятся в несколько стадий: определение границы системы; выделение действующих лиц, вариантов использования, начальных и конечных событий; подготовка типовых сценариев; описание внештатных ситуаций, выделение внешних событий, построение диаграмм деятельности, структурирование действующих лиц и вариантов использования; проверка по модели классов предметной области [20].

Каждая из трёх моделей описывает свои особенности специализированной установки. Основной моделью является модель классов, описывающая систему объектов, которыми оперируют модели состояний и взаимодействий.

Диаграммы состояний и последовательностей позволяют сформировать таблицу соответствия между технологическими операциями/переходами и техническими средствами для реализации технологии АДС в контролируемой атмосфере (табл. 1). В результате составляется список узлов, необходимый для создания установки: рабочая камера; станочный комплекс (манипулятор сва-

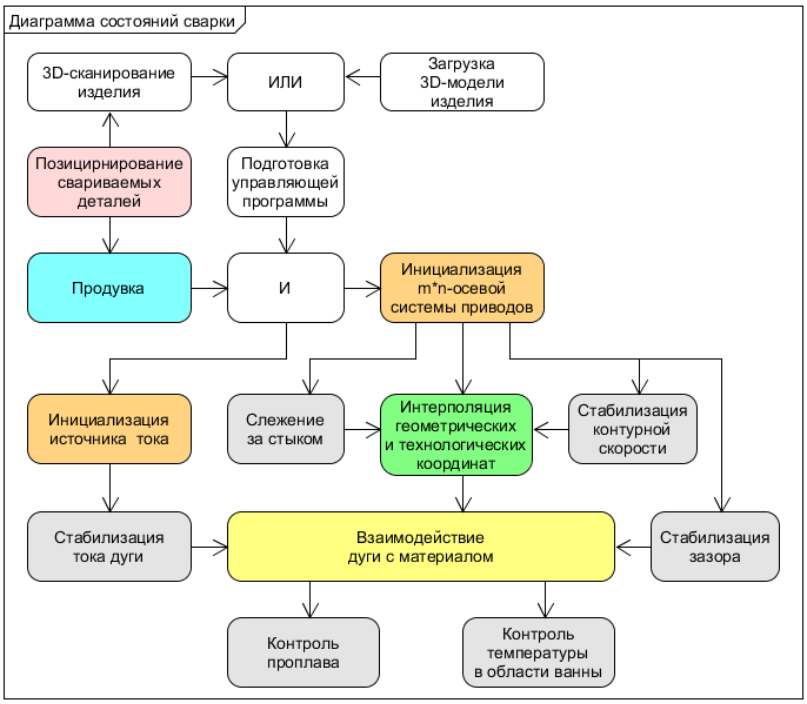


Рис. 4. Диаграмма состояний подготовки и проведения процесса аргонодуговой сварки

Fig. 4. Diagram of the states of preparation and conduct of the argon arc welding process

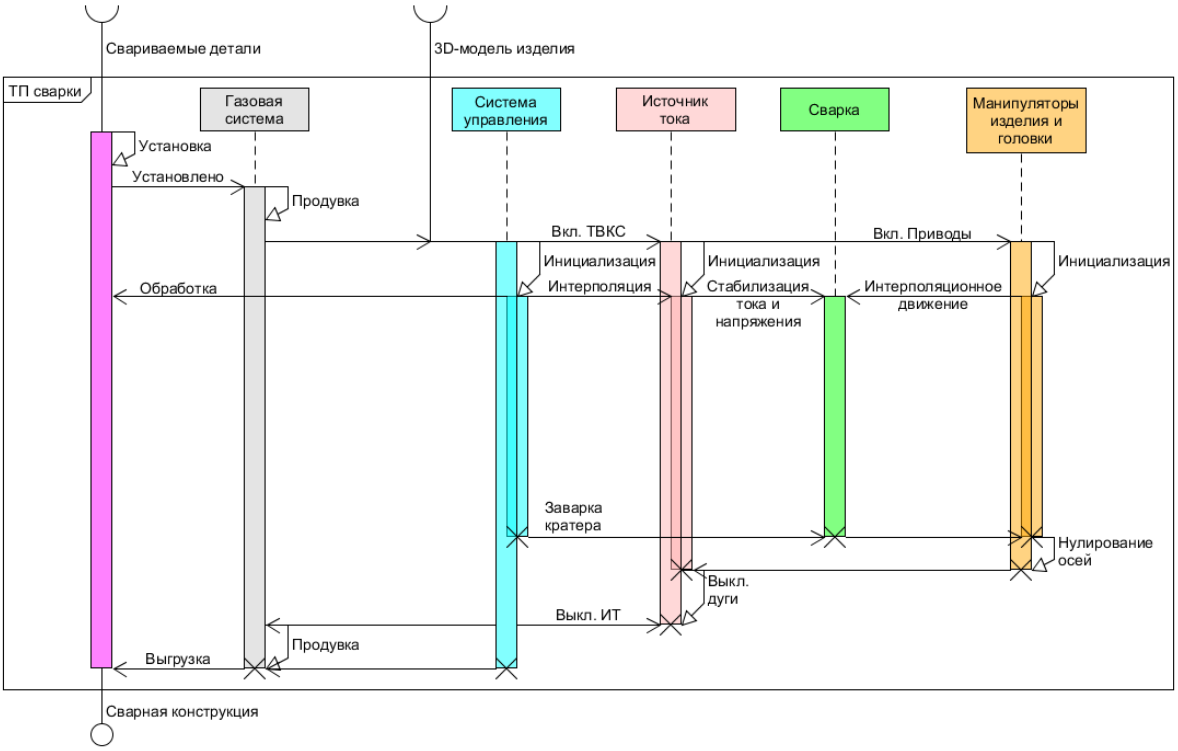


Рис. 5. Диаграмма последовательности аргонодуговой сварки (ИТ – источник тока)

Fig. 5. Argon arc welding sequence diagram (IT current source)

рочной головки, манипулятор изделия, задняя бабка, сварочная головка); энергетический блок, вакуумные станции, комплект пневматических средств; узел водяного охлаждения; блок напуска инертного газа аргона; устройства управления и др.

Таблица 1

**Соответствие между технологическими переходами и техническими средствами**

Table 1

**Correspondence between technological transitions and technical means**

| Операция | Узел | Технические средства |
|---|---|---|
| Предварительное разрежение | Вакуумная станция<br>Система управления<br>Рабочая камера<br>Замкнутое водоохлаждение | Вакуумные насосы<br>Запорная аппаратура<br>Трубопроводы<br>Фильтры<br>Масляные ловушки<br>Датчики давления<br>Датчики температуры<br>Устройство управления<br>Оболочка<br>Иллюминаторы<br>Перчаточный ввод<br>Откатная крышка<br>Патрубки<br>Чиллер<br>Трубопроводы<br>Запорная аппаратура<br>Датчик давления<br>Фильтры |
| Подготовка контролируемой среды | Блок напуска инертного газа<br>Система управления | Баллоны инертного газа<br>Рампа<br>Трубопроводы<br>Датчик давления<br>Клапаны<br>Компрессор<br>Ресивер<br>Приборы<br>Устройство управления |
| Установка изделия | Манипулятор изделия<br>Задняя бабка<br>Система управления | Несущая рама<br>Планшайба<br>Направляющие<br>Шариковинтовая пара<br>Электродвигатели<br>Сервоприводы<br>Устройство управления |
| Позиционирование вольфрамового электрода | Манипулятор сварочной головки<br>Сварочная головка<br>Система управления | Направляющие<br>Шариковинтовая пара<br>Электродвигатели<br>Сервоприводы<br>Устройство управления<br>Комплект электрической разводки |
| Сварка | Энергетический блок<br>Станочный комплекс<br>Система управления | Источники тока<br>Комплект силовой разводки<br>Регулятор слежения за длиной дуги<br>Исполнительные механизмы<br>Устройства управления |

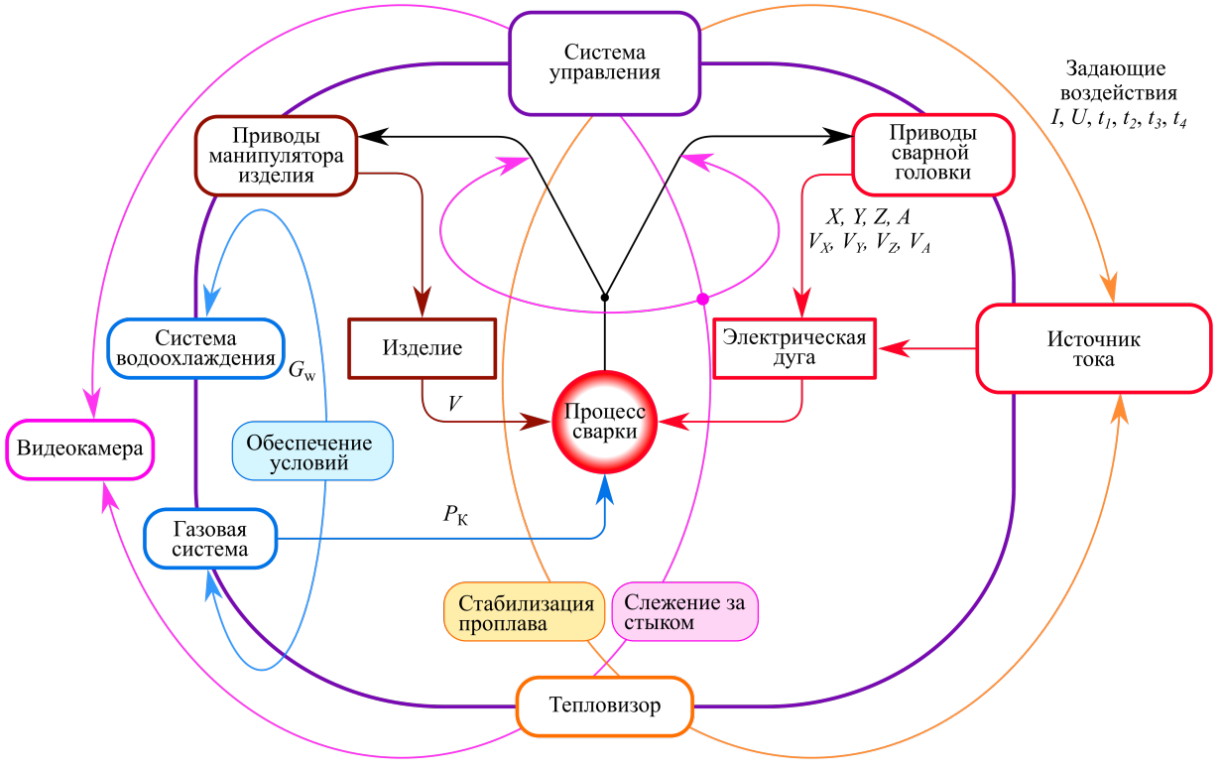


Рис. 6. Концептуальная модель аргонодуговой сварки ($I$ – ток сварки, $U$ – напряжение дуги, $t_1$, $t_2$, $t_3$, $t_4$ – длительности импульса и паузы, время нарастания и спада импульса, $V$ – скорость сварки, $P_k$ – рабочее давление в камере, $X$, $Y$, $Z$, $V_x$, $V_y$, $V_z$, $V_A$ – соответственно координаты и скорости по осям, $G_w$ – расход воды)

Fig. 6. Conceptual model of argon arc welding ($I$ – welding current, $U$ – arc voltage, $t_1$, $t_2$, $t_3$, $t_4$ – pulse and pause durations, pulse rise and fall time, $V$ – welding speed, $P_k$ – working pressure in the chamber, $X$, $Y$, $Z$, $V_x$, $V_y$, $V_z$, $V_A$ – coordinates and velocities along the axes, respectively, $G_w$ – water flow)

Установки для реализации технологии аргонодуговой сварки неплавящимся электродом в инертной среде отличаются различными конструкционными решениями узлов, площадью размещения, экономичностью.

К техническим параметрам установки относятся:

– геометрическая форма и размеры, толщина стенки, натекание, рабочее давление (рабочая камера);

– ток дуги, продолжительность включения, напряжение холостого хода, мощность (энергетический блок);

– мощность электрических двигателей, диапазоны скорости и перемещения, время разгона и торможения, точность позиционирования (манипуляторы);

– давление и температура воды, производительность насосов (водяное охлаждение);

– производительность низко- и высоковакуумных насосов, время выхода на режим, время срабатывания запорной аппаратуры, давление в насосах (вакуумная станция);

– концентрация кислорода, азота, водорода, паров воды в рабочей камере (блок напуска инертного газа).

При разработке концептуальной модели специализированной установки необходимо установить её структуру, выбрать элементы, определить параметры, функциональные зависимости, ограничения, критерии. На этом этапе определяются наиболее существенные элементы и взаимодействия между ними (рис. 6).

Проектирование сварочного оборудования на основе объектно-ориентированного подхода обеспечивает поддержку системно-инженерных процессов, начиная с концептуального дизайна и до поздних стадий жизненного цикла системы. Выделяя совокупность объектов и отношений между ними, можно построить модели оборудования и на их основе разработать программные средства для исследования характеристик и свойств изделий. Средства языка моделирования UML позволяют построить большое количество различных диаграмм: классов, объектов, компонентов, вариантов использования, последовательностей, коммуникаций, состояний, деятельностей, размещения, взаимодействий.

**Измерительная страта**

На измерительной страте рассматриваются функции контроля состояния процесса АДС и элементов сварочного оборудования. Элементами измерительной страты, образующими интерфейс между подсистемами технологической и информационной страт, являются видеокамеры, электронные приборы и нормализаторы, фотодатчики положения исполнительных механизмов, расходомеры, датчики давления и воды, преобразователи, различные средства измерительной техники и др.

На рис. 7 представлен кадр видеосъёмки процесса АДС неплавящимся электродом. На рисунке видны не только вольфрамовый электрод, но и граница электронной дуги (область 1), область плотной плазмы с четкой границей (область 2). Далее плотность плазмы резко уменьшается за счет того, что ионы разлетаются и рекомбинируют (область 3). Области двойного электрического слоя (катодного и анодного) плазма не доходят до объекта нагрева. В анодной области видна только электронная дуга (область 4). В области анода образуется избыток отрицательного пространственного заряда и появляется анодное падение напряжения $U_a$.

Плазменный столб не граничит с электродом и изделием. Наличие сил кулоновского взаимодействия между электронами и ионами делает их соударения в плазменном столбе более сложными, чем столкновения нейтральных частиц. Вместо броуновского беспорядочного движения молекул траектории заряженных частиц становятся более извилистыми, соответствующими изменению электрического поля в плазме. Результатом упругих соударений электрона с частицами является увеличение кинетической энергии последних, т.е. повышение температуры плазменного столба. Энергия тепловых электронов в дуге составляет примерно 1 эВ.

Скорость и энергия частиц в плазме распределяются по закону Максвелла-Больцмана. Средняя квадратичная скорость частиц может быть определена из равенства

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2}kT,$$

откуда

$$v = \sqrt{3kT/m} = \sqrt{3RT/A},$$

где $m$ – масса частицы, $k$ – постоянная Больцмана, $k = 1{,}38 \cdot 10^{-21}$ Дж/к, А – атомная масса; $R$ – универсальная газовая постоянная, $T$ – температура газа, К.

Изделие нагревается вследствие потока электронов и теплового излучения. Температура в различных областях электрической дуги отличается: в катодном слое – 2400 °С, в середине плазменного столба – до 6000 °С, на изделии – примерно 2600 °С [21].

Процесс АДС отличается стохастическим характером. При возникновении несоответствия между имеющимся объемом априорной информации и параметрами процесса, неразрешаемого другими методами управления, применяется адаптивное управление [22]. В этом случае, неопре-

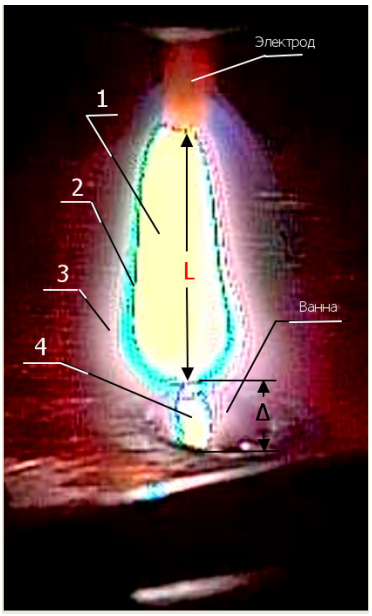


Рис. 7. Кадр видеосъёмки процесса электродугового нагрева
Fig. 7. Video frame of the electric arc heating process

деленность может быть уменьшена или устранена. Наряду с переменными, доступными для контроля посредством прямых измерений, процесс АДС в контролируемой атмосфере характеризуется переменными, которые рассчитываются косвенными измерениями. Расширение средств измерений снижает фактор неопределенности.

Современные средства контроля [23], включающие электронные и оптические средства видеонаблюдения и измерения, позволяют контролировать технологические параметры процесса (зазор между электродом и изделием, положение электрода относительно стыка, температурное поля в ванне расплава и др.), что отчасти компенсирует воздействие случайных факторов на процесс АДС. Устройство видеонаблюдения состоит из видеокамеры, монитора, стробоскопа для защиты объектива камеры от напыления и брызг металла при сварке.

Важнейшее значение для получения качественного сварного соединения имеет поддержание в процессе сварки постоянного зазора между вольфрамовым электродом и изделием. Первичная обработка напряжения дуги осуществляется модулем источника тока, затем сигнал подается на вход модуля аналого-цифрового преобразователя устройства ЧПУ. Система управления (СУ) обеспечивает два варианта слежения за длиной дуги: по заданному напряжению и первоначально выставленному зазору между электродом и изделием. Во втором случае, программно-аппаратные средства СУ определяет напряжение дуги, соответствующее первоначально выставленному зазору, и в дальнейшем поддерживает рассчитанное значение напряжения дуги на протяжении всего процесса сварки. В зависимости от знака и значения рассогласования между заданным и текущим напряжением регулятор выдаёт управляющий сигнал на привод перемещения электрода. Регулятор имеет зону нечувствительности, значение которой определяет оператор. При возрастании зазора происходит увеличение скорости перемещения электрода. На практике нашёл применение и другой алгоритм: для устранения рассогласования исполнительный механизм перемещается на максимальной скорости.

Для контроля температурного поля в области сварки используется тепловизор. Оптическая камера обрабатывает сигналы пропорциональные энергии излучения и передает по цифровому протоколу информацию в промышленный компьютер (ПК), который выполняет обработку по-

лученных данных, визуализацию теплового изображения поверхности изделия. Использование тепловизора позволяет реализовать контур управления по температуре, прогнозировать структуру сварного соединения, компенсировать недостатки априорной технологии с заранее заданными значениями параметров процесса.

**Информационная страта**

При проектировании сварочного оборудования к числу наиболее наукоемких задач относится разработка информационного обеспечения и программно–аппаратных средств системы управления, представляющей собой особый класс динамических систем, которые отличаются наличием самостоятельных функций и целей управления, высоким уровнем системной организации.

На информационной страте рассматривается множество взаимосвязанных и взаимодействующих подсистем управления, выполняющих самостоятельные и общесистемные функции управления и передачи данных. Элементами информационной страты являются оборудование вычислительных цифровых сетей, промышленные компьютеры (ПК), программируемые логические контроллеры (ПЛК), устройства числового программного управления, микропроцессорные и аналоговые устройства, устройства измерения параметров и видеонаблюдения, объединённые в единую цифровую локальную сеть, по которой осуществляется обмен информацией. Программно-аппаратные средства таких СУ позволяют совместить функции проектирования технологии в машинном масштабе времени и управления процессом сварки в реальном масштабе времени.

С развитием мультипроцессорных СУ появилась возможность создания целостных производственных систем АДС, базирующихся на принципах комплексной автоматизации основных и вспомогательных технологических операций, лёгком и удобном интерфейсе оператора к информационным и вычислительным ресурсам. Как правило, проектирование 3D-модели изделия, содержащей комплекс конструкторских, технологических и механических параметров, осуществляется в среде системы автоматизированного проектирования (CAD-система). Графический файл 3D-модели изделия поступает на вход постпроцессора, который рассчитывает координаты перемещения исполнительных механизмов станочного комплекса для формирования управляющей программы устройства ЧПУ.

Современная система управления процессом АДС в контролируемой атмосфере включает следующие основные компоненты:

– промышленный компьютер, программно-аппаратные средства которого выполняют моделирование технологического процесса, оптимизацию режима сварки, разработку управляющей программы на базе 3D-модели изделия, визуализацию элементов оборудования и переменных процесса, документирование параметров и др.;

– устройство ЧПУ, формирующее сигналы на исполнительные механизмы и источник тока в соответствии с командами управляющей программы;

– программируемый логический контроллер, обеспечивающий условия проведения технологического процесса (получение контролируемой среды в рабочей камере, диагностика узлов и механизмов оборудования и др.);

– локальные микропроцессорные устройства (анализ химического состава инертной среды, локальное регулирование механическими перемещениями, источниками тока, измерение параметров процесса и др.).

Диаграмма уровней управления с расшифровкой атрибутов, операций и обязанностей представлена на рис. 8. Иерархическое построение СУ обеспечивает её повышенную устойчивость к внешним воздействиям, согласует отдельные задачи элементов и подсистем с общими задачами всей системы, позволяет сократить длины электрических разводок, минимизирует электромагнитные помехи на измерительные цепи.

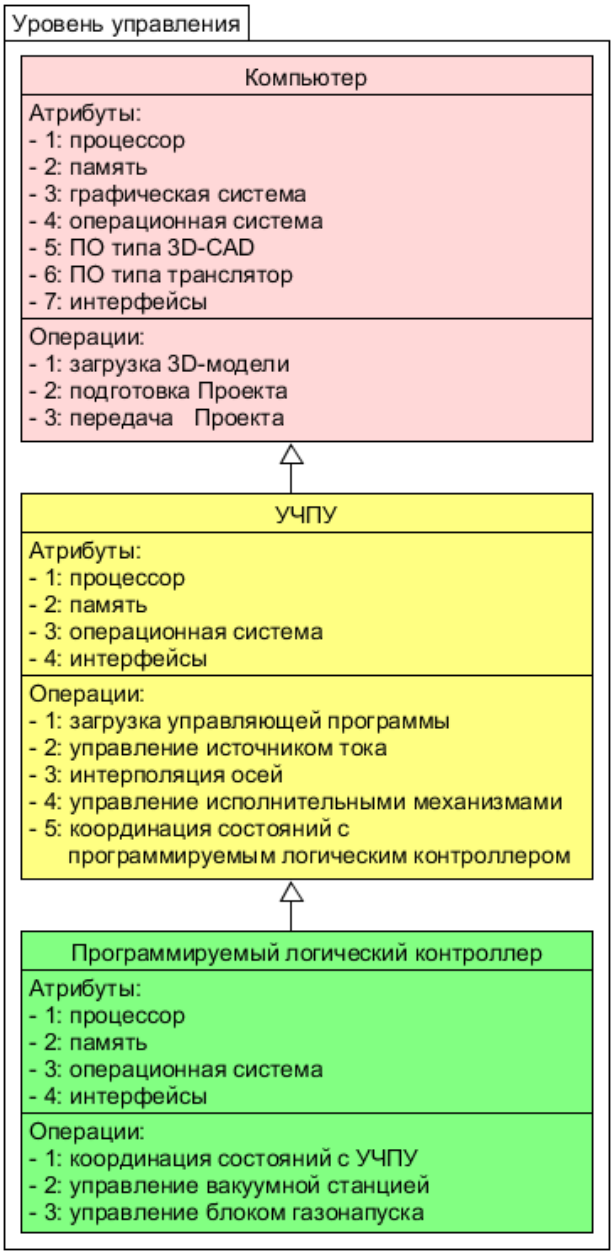


Рис. 8. Диаграмма уровней управления

Fig. 8. Diagram of control levels

Вычислительный потенциал СУ обеспечивает автоматическое управление процессом получения разрежения в рабочей камере, слежение за длиной дуги, взаимосвязанное перемещение электрода и изделия, управление контурами тока сварки, напряжения дуги, скоростей сварки и подачи присадочного проволоки, документирование основных параметров сварки (паспорт сварки детали с указанием даты и номера изделия).

**Функции системы управления**. Основной задачей управления процессом АДС является получение сварного соединения, соответствующего заданным техническим требованиям. Процесс сварки – многомерный объект управления с векторными входами и выходами измеряемых и неизмеряемых параметров. Основные функции СУ определяются через совокупность её внешних взаимодействий (рис. 9):

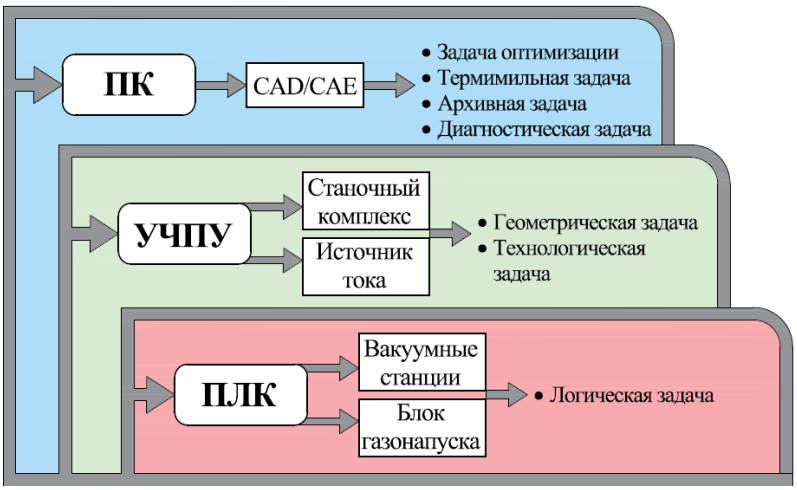


Рис. 9. Функции управления

Fig. 9. Control functions

– управление механизмами перемещения изделия и сварочной головки (геометрическая задача);

– последовательно–параллельное управление дискретными механизмами, элементами вакуумных станций (логическая задача);

– взаимосвязанное управление источником питания сварочной дуги, приводами механических перемещений и подачи присадочной проволоки (технологическая задача);

– организация интерфейса с оператором (терминальная задача);

– документирование параметров сварки (архивная задача);

– идентификация состояния основных элементов установки, формирование файлов состояния элементов, файлов событий и аварийных ситуаций (диагностическая задача);

– математическое моделирование сварки (задача оптимизации);

– диспетчеризация приведённых выше задач (системная задача).

Решение ***геометрической и технологической задач управления*** обеспечивает устройство числового программного управления (ЧПУ). Управляющая программа процесса сварки составляется в стандартных G-кодах и M-функциях. При этом осуществляется программирование всех механических осей и технологических параметров (координаты точек, ток сварки, напряжение дуги, скорость подачи присадочной проволоки, колебание электрода).

Организация диалога с оператором (***терминальная задача***) выполняется через человеко-машинный интерфейс. Для визуального наблюдения за состоянием механизмов вакуумных станций используется мнемосхема установки, на которой отображается динамика процесса сварки. Программное обеспечение обеспечивает удобный многооконный интерфейс «оператор–система», в котором реализован простой доступ к информации и средствам управления «нажал и смотри». Использование цветных изображений элементов мнемосхемы, максимально приближённых к виду реальных конструкций, облегчает работу оператора.

СУ обеспечивает высокий уровень информационного обеспечения оператора и технолога: диагностика работы насосов по температуре, контроль воды, аварийная звуковая и световая сигнализации, набор блокировок при некорректных действиях оператора, цифровая и графическая визуализация параметров сварки, увеличение количества датчиков для локализации неисправности. При возникновении внештатных ситуаций обеспечивается перевод установки в безопасное состояние, на мониторе появляется окно, в котором отображается код ошибки, описание ошибки и рекомендации оператору.

СУ в режиме реального времени документирует основные параметров процесса сварки (***архивная задача***): время (общее время и время включения), ток и напряжение электрической дуги, параметры управляющей программы (координаты осей, скорость сварки), давление в рабочей камере и др.

Решение ***диагностической задачи*** управления подразумевает идентификацию состояния ПС, формирование файлов состояния отдельных элементов, файлов событий и аварийных ситуаций. Файл событий имеет важное значение для технического диагностирования основных элементов установки. Периодичность опроса и записи которых в память определяет оператор. Также возможна передача данных по сети Internet на сервисную службу завода-изготовителя. В результате повышается стабильность работы установки, осуществляется диагностика и прогнозирование работоспособности элементов, отслеживаются некорректные действия оператора.

**Алгоритмическая страта**

На алгоритмическом уровне рассматриваются общие алгоритмы управления, математические модели (ММ), технологические карты процесса сварки. Элементами данной страты являются алгоритмы управления, записанные в виде программ на алгоритмических языках в памяти микропроцессорных устройств.

Основной задачей на данном уровне является проектирование технологии АДС на двух уровнях: формирование структуры операции (выбор кинематической схемы сварки, предварительный прогрев стыка, непрерывный/импульсный режим тока сварки и подачи присадочной проволоки, создание благоприятных условий образования ванны и заварки кратера и др.) и оптимизация значений параметров процесса.

Математическое моделирование процесса сварки включает в себя исследование физических явлений; изучение закономерностей плавления, движения и затвердевания материала. Одним из подходов к исследования сварочного производства является многоуровневый многомасштабный подход, сочетающий в себе модели, описывающие состояние системы в микро-, мезо- и макро- масштабах. Многомасштабное моделирование предполагает моделирование сварочного производства на различных уровнях его детализации. Преимущество многомасштабного подхода состоит в возможности анализа процесса на разных масштабных уровнях. При создании многоуровневых информационных систем и схем многомасштабного моделирования используются либо теоретические построения, основанные на применении методов теории графов и множеств, либо описательные и неформализованные подходы к созданию многомасштабных моделей [24–25]. На основе многомасштабных композиций строятся сложные иерархические программные системы, применяемые для решения задач многомасштабного моделирования физических явлений и процессов [26].

Разработка математической модели процесса АДС осуществляется как на имеющихся теоретических и экспериментальных положениях механики двухфазных сред, так и на новых разработках и экспериментальных данных. Выделяют два направления проектирования ММ процесса сварки:

– на основе баз данных и знаний, включающих в себя результаты многочисленных исследований;

– на базе аппарата гидромеханики, механики деформации твердых тел, методов моделирования, исследования операций.

Математической базой первого, вероятностно-статистического метода, являются положения теории вероятностей и математическая статистика. Главным недостатком этого подхода является возможность разработки модели только для исследованных материалов, что ограничивает пределы применения подобных пакетов.

Второе направление базируется на математическом описании процесса сварки. Разработка наукоемких моделей для известных и новых материалов имеет важное прикладное значение.

Для анализа тепловых процессов АДС сварки используется объемный источник нагрева с нормальным (гауссовским) распределением удельной тепловой мощности по всем координатным осям в объеме тела, имеющего форму эллипсоида (модель Голдака) [27].

Поток теплоты создается дугой, перемещаемой вдоль стыка и совершающей периодические поперечные колебания. Тепловой поток $q_a(x, y)$, создаваемый плазмой дуги, описывается соотношением (нормальное распределение)

$$q_a(x,y) = \frac{2P(t)}{\pi R^2}\exp\left\{-\frac{2}{R^2}\left[(x-x_0)^2-(y-y_0)^2\right]\right\},$$

где $P(t)$ — мощность теплового потока, периодически изменяющаяся во времени $t$, $R$ — радиус действия плазмы дуги, $(x_0, y_0)$ — координаты центра источника, изменяющиеся во времени $t$.

Для описания процессов, проходящих в расплавленном металле ванны, необходимо решить нелинейную систему уравнений магнитной гидродинамики движения вязкой жидкости, систему уравнений Максвелла распределения векторов напряженностей электрической и магнитной составляющих электромагнитных полей. При отсутствии протекания тока через металлическую ванну в качестве силовых факторов, воздействующих на расплавленный металл, выступают термогравитационная сила Архимеда и термокапиллярная сила Марангони.

Процессы, протекающие в сварочной ванне, описываются системой уравнений электрогидродинамики, которые получаются объединением системы уравнений гидродинамики и системы уравнений Максвелла.

Система уравнений Максвелла для неподвижной среды в системе СИ имеет вид

$$\nabla\times\boldsymbol{E} = -\frac{\partial\boldsymbol{B}}{\partial t},\quad \nabla\cdot\boldsymbol{D} = \rho_e; \tag{1}$$

$$\nabla\times\boldsymbol{H} = \boldsymbol{j}+\frac{\partial\boldsymbol{D}}{\partial t},\quad \nabla\cdot\boldsymbol{B} = 0. \tag{2}$$

Уравнения (1) и (2) дополняются материальными уравнениями

$$\boldsymbol{D} = \varepsilon\varepsilon_0\boldsymbol{E},\quad \boldsymbol{B} = \mu\mu_0\boldsymbol{H},\quad \boldsymbol{j} = \sigma\boldsymbol{E}.$$

Здесь $\rho_e$ – объемная плотность заряда в жидкости, $\boldsymbol{E}$ – вектор электрической напряженности, $\boldsymbol{D}$ – вектор электрической индукции, $\boldsymbol{H}$ – вектор магнитной напряженности, $\boldsymbol{B}$ – вектор магнитной индукции, $\boldsymbol{j}$ – вектор плотности тока проводимости, $\sigma$ – удельная проводимость, $\mu_0$ – магнитная постоянная ($\mu_0 = 4\pi\cdot10^{-7}$ Гн/м), $\mu$ – относительная магнитная проницаемость, $\varepsilon$ – относительная диэлектрическая проницаемость среды, $\varepsilon_0$ – электрическая постоянная.

При изменении поля во времени, согласно уравнениям (1) и (2), в среде индуцируется магнитное поле $\boldsymbol{H}$ за счет токов проводимости $\boldsymbol{j} = \sigma\boldsymbol{E}$ и токов смещения $\boldsymbol{j}_s = \partial\boldsymbol{D}/\partial t$.

Уравнения, описывающие нестационарное течение вязкой несжимаемой жидкости, включают уравнение неразрывности, уравнение изменения количества движения и уравнение изменения температуры

$$\nabla\cdot\boldsymbol{v} = 0;$$

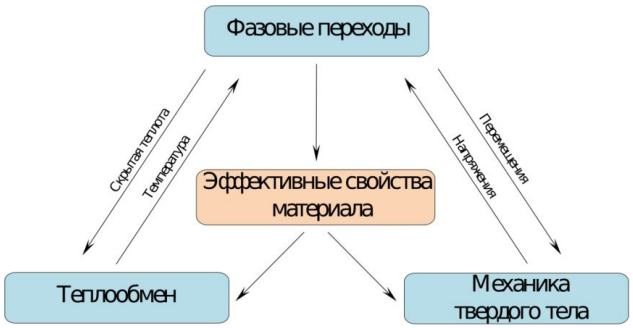


Рис. 10. Моделирование фазовых превращений, сопряженных с теплопередачей и механикой твердого тела
Fig. 10. Modeling of phase transformations associated with heat transfer and solid mechanics

$$\frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial t} + (\nabla \cdot \boldsymbol{v})\boldsymbol{v} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \mu \Delta \boldsymbol{v} + \boldsymbol{g} + \boldsymbol{f};$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \boldsymbol{v} \cdot \nabla T = a \Delta T.$$

Здесь $\boldsymbol{v}$ – скорость жидкости, $p$ – давление, $T$ – температура, $\mu$ – динамическая вязкость жидкости, $a$ – коэффициент температуропроводности жидкости, $\boldsymbol{g}$ – вектор ускорения силы тяжести, $\boldsymbol{f}$ – объемная внешняя сила.

Математическое исследование процесса сварки осуществляется в среде многодисциплинарных программных комплексов, обладающих большим набором инструментов для моделирования движения жидкости, переноса тепла и реакций, позволяют охватить весь спектр протекающих процессов (тепломассообмен, фазовые переходы и др.). Функциональные возможности программных комплексов позволяют моделировать диффузионные, а также сдвиговые фазовые превращения (рис. 10). Совместное использование термомеханического анализа открывает возможности для более сложного и детального анализа процесса сварки.

Таким образом, алгоритмический уровень объединяет множество правил и законов управления, которые могут быть записаны на какой-либо носитель информации. В то же время, правила и законы управления не могут быть реализованы без остальных, имеющих физическое воплощение уровней иерархической структуры производственной системы.

В качестве прикладного инструмента для разработки ММ процесса АДС используются компьютерные системы автоматизированного проектирования (Computer-Aided Design, CAD), автоматизированного производства (Computer-Aided Manufacturing, CAM), инженерных расчётов (Computer-Aided Engineering, CAE), включая анализ конечных элементов (Finite Element Analysis, FEA), динамику многотельных систем (Multi-Body Dynamics, MBD), вычислительную гидродинамику (Computational Fluid Dynamics, CFD), взаимодействие жидкости (газа) с конструкцией (Fluid-Structure Interaction, FSI), электромагнитный анализ (Electro-Magnetic Analysis, EMA), автоматизированную оптимизацию (Computer-Aided Optimization, CAO).

**Системная страта**

На системной страте рассматриваются задачи оценки качества моделей на нижестоящих уровнях с учётом основных структурных и параметрических характеристик, общие комплексные вопросы, определяется методика оптимизации параметров процесса на базе векторного критерия. На данной страте анализируются все технические и экономические вопросы, задаются проектные ограничения.

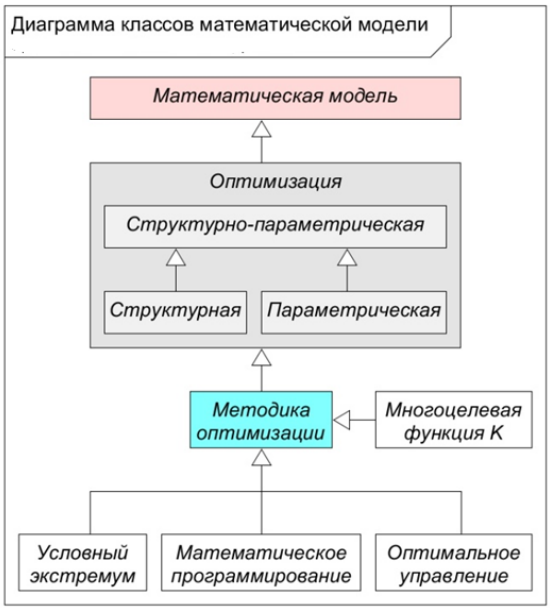


Рис. 11. Элементы оптимизации сварочного производства
Fig. 11. Elements of optimization of welding production

При постановке задачи оптимизации необходимо ввести в рассмотрение все основные параметры ПС. Процедура оптимизации позволяет определить наиболее эффективные технологии, структуру и состав оборудования при выполнении параметрических и функциональных ограничений.

В задаче оптимизации предусматривается наличие трёх основных элементов: математической модели, целевой функции и метода оптимизации (рис. 11). Математическая модель и целевая функция описывают все существенные для проектирования ПС связи технологических (допуски на размер изделия, структура и свойства сварного соединения и т.д.), технических (кинематические возможности установки, мощность исполнительных механизмов, параметры энергетического блока) и организационных (согласование работы различных элементов установки) ограничений на искомые решения.

Задача оптимизации сварочного производства является многокритериальной (многоцелевой или векторной), так как при выборе наилучшего варианта приходится учитывать множество технико-экономических требований, часто противоречивых.

Известны различные принципы выбора оптимальных решений: доминантности, Парето, Слейтера, Джеффри, Нэша, компромисса, гарантированного результата, критерия Гурвица и другие. К числу наиболее эффективных и распространенных относится область Парето, которая характеризуется тем важным свойством, что на ней ни одно решение не может быть улучшено по одному из показателей без ухудшения по другому показателю. При выделении области доминирующих решений значительно сокращается перечень возможных решений и тем самым облегчает выбор единственного решения.

В ряде работ, посвящённых методам решения задач многоцелевой оптимизации [28–30], показана эффективность построения процедуры оптимизации по модульно-иерархическому принципу [29]. Разбиение процедуры многоцелевой оптимизации на уровни обусловлено сложностью рассматриваемой задачи. Нижний уровень определяет способ задания и структуру множества альтернатив параметров производственной системы сварки и соответствующее им множество частных критериев оптимизации. На среднем уровне значительно сокращается допустимое мно-

жество вариантов выбора параметров путем определения их эффективных (Парето-оптимальных) значений. Численная реализация моделей этого уровня позволяет сформировать пакет эффективных решений. На верхнем уровне из пакета выбирается единственный наилучший вариант. Наиболее распространенным способом поиска единственного решения является метод свертки локальных критериев оптимизации, сводящий многоцелевую задачу оптимизации к соответствующей скалярной задаче математического программирования, когда многоцелевая функция «свёртывается» в виде одной результирующей функции $Q$. Для выпуклой области поиска оптимизируемых управляемых параметров обычно применяется свертка Карлина [31]

$$Q = \max\left(a_v \bar{K}_v + a_\mu \bar{K}_\mu\right),$$

где $a_v$ и $a_\mu$ – весовые коэффициенты. Значения критериев $\bar{K}_v$ и $\bar{K}_\mu$ определяются соотношениями естественной нормализации

$$\bar{K}_{v,\mu} = \frac{\bar{K}_{v,\mu} - \min \bar{K}_{v,\mu}}{\max \bar{K}_{v,\mu} - \min \bar{K}_{v,\mu}}.$$

Набор критериев в зависимости от выбранной модели может быть любым, при этом алгоритм поиска эффективных решений не меняется. При решении задачи многоцелевой оптимизации большое значение имеет способ задания и учета определяющих элементов (нормализации, свертки, приоритета критериев).

Системный уровень подобно кровеносной системе биологического организма обеспечивает коммуникационные процессы всех разнородных страт производственной системы АДС в контролируемой атмосфере для достижения главной задачи: получение сварного соединения с заданной структурой и свойствами.

Стратифицированное представление производственной системы для реализации технологии АДС позволяет раскрыть взаимодействие разнородных по своей природе уровней и межуровневых связей, имеющих различные интерфейсы. Приведенная иерархическая абстракция, состоящая из технологической, инструментальной, измерительной, информационной, алгоритмической, системной страт позволяет достаточно полно раскрыть содержание производственной системы сварки.

**Заключение**

Для развития сварочного производства необходимо создать единую цифровую платформу, объединяющую области проектирования и численных расчётов. Проектирование производственной системы на основе объектно-ориентированного подхода обеспечивает поддержку системно-инженерных процессов, начиная с концептуального дизайна и до поздних стадий жизненного цикла системы. Интеграция технологических, проектных, расчетных и эксплуатационных процессов на базе CASE-технологии позволяет максимально автоматизировать процесс разработки, обеспечивает отсутствие ошибок и простоту в обслуживании программных продуктов.

Современная СУ, связывающая в единое информационное пространство промышленный компьютер, устройство ЧПУ, программируемый контроллер, цифровые и аналоговые средства измерения, обеспечивает получение сварного соединения заданной структуры и свойств. Автоматизация процесса сварки на базе современных вычислительных средств открывает новые возможности управления. С развитием микропроцессорных устройств и локальных вычислительных сетей появилась возможность создания целостных технологических систем обработки данных.

Дальнейшее развитие предполагается в следующих направлениях:

– разработка эффективных алгоритмов управления процессом сварки в реальном масштабе времени;

– прогнозирование механических и теплофизических свойств изделий с различной структурой;

– разработка новых способов принятия решений в алгоритме структурно-параметрической оптимизации;

– использование более мощных аппаратных средств для технической реализации системы управления.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Рудской А.И., Волков К.Н., Соколов Ю.А., Кондратьев С.Ю.** Цифровые производственные системы: технологии, моделирование, оптимизация. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. – 828 с.

[2] **Рудской А.И., Волков К.Н., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А.** Физические процессы и технологии получения металлических порошков из расплава. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. – 610 с.

[3] **Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А.** Алгоритм и технологические процессы синтеза порошковых деталей электронным лучом в вакууме // Технология машиностроения. 2015. № 1. С. 11–16.

[4] **Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А.** Технология послойного электронно-лучевого синтеза порошковых изделий в вакууме // Заготовительные производства в машиностроении. 2014. № 8. С. 40–45.

[5] **Kondrat'ev S.Y., Gorynin V.I., Popov V.O.** Optimization of the parameters of the surface-hardened layer in laser quenching of components // Welding International. – August 2012. – Vol. 26. – No. 8. – Pp. 629–632.

[6] **Кондратьев С.Ю., Фукс М.Д., Фролов М.А., Петров С.Н.** Анализ структуры, фазового состава и механических свойств трубного сварного соединения из жаропрочного сплава HP40NbTi // Металловедение и термическая обработка металлов. 2020. № 11 (785). С. 21–31.

[7] Автоматизированное проектирование и производство в машиностроении / Под общ. ред. Ю.М. Соломенцева, В.Г.Митрофанова. – М.: Машиностроение, 1986. – 256 с.

[8] **Месарович М., Мако Д., Такахара И.** Теория иерархических многоуровневых систем. – М.: Мир, 1973. – 344 с.

[9] Теория сварочных процессов / Под ред. В.В. Фролова. М.: Высшая школа, 1988. 559 с.

[10] **Piekarska W., Kubiak M.** Modeling of thermal phenomena in single laser beam and laser-arc hybrid welding processes using projection method // Applied Mathematical Modelling. 2013. Vol. 37. Pp. 2051–2062.

[11] **Wang S., Nates R., Pasang T., Ramezani M.** Modelling of gas tungsten arc welding pool under marangoni convection // Universal Journal of Mechanical Engineering. 2015. Vol. 3. Pp. 185–201.

[12] **Kou S., Sun D.K.** Fluid flow and weld penetration in stationary arc welds // Metallurgical Transactions A. 1985. Vol. 16. Pp. 203–213.

[13] **Kou S., Wang Y.H.** Computer simulation of convection in moving arc weld pools // Metallurgical Transactions A. 1986. Vol. 17. Pp. 2271–2277.

[14] **Lin M.L., Eagar T.W.** Pressures produced by gas tungsten arcs // Metallurgical Transactions B. 1986. Vol. 17. Pp. 601–607.

[15] **Oreper G.M., Szekely J.** Heat and fluid flow phenomena in weld pool // Journal of Fluid Mechanics. 1984. Vol. 147. Pp. 63–76.

[16] **Шолохов М.А.** Траекторные задачи при автоматической и роботизированной сварке. Методы и алгоритмы решения, датчики, программно-аппаратные средства / Под ред. Э.А. Гладкова, Р.А. Перковского. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 168 с.

[17] **Буч Г.** Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений на C++. Бином, 1998. 720 с.

[18] **Гома Х.** UML. Проектирование систем реального времени, параллельных и распределенных приложений. М.: ДМК Пресс, 2016. 700 с.

[19] **Новиков Ф., Иванов Д.** Моделирование на UML. Учебно-методическое пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. 200 с.

[20] **Рамбо Дж., Блаха М.** UML 2.0. Объектно-ориентированное моделирование и разработка. СПб.: Питер, 2007. 544 с.

[21] **Краснов А.Н., Шаривкер С.Ю., Зильберберг В.Г.** Низкотемпературная плазма в металлургии. М.: Металлургия, 1970. 216 с.

[22] Адаптивное управление технологическими процессами / Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов, С.П. Протопопов и др. М.: Машиностроение, 1980. 536 с.

[23] **Shen H., Lin T., Chen S., Li L.** Real-Time Seam Tracking Technology of Welding Robot with Visual Sensing // J. Intell, Robot Syst., 2010, No. 59. – Pp. 283–298.

[24] **Годунов С.К., Киселев С.П., Куликов И.М., Мали В.И.** Моделирование ударноволновых процессов в упругопластических материалах на различных (атомный, мезо и термодинамический) структурных уровнях. Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований, 2014. 279 с.

[25] **Borg M.K., Lockerby D.A., Reese J.M.** A Hybrid molecular-continuum method for unsteady compressible multiscale flow // Journal of Fluid Mechanics. 2015. Vol. 768. Pp. 388–414.

[26] **Абгарян К.К., Гаврилов Е.С., Марасанов А.М.** Информационная поддержка задач многомасштабного моделирования композиционных материалов // International Journal of Open Information Technologies. 2017. № 12. С. 24–29.

[27] **Goldak J., Chakravarti A., Bibby M.** A new finite element model for welding heat source // Metallurgical Transactions. B. 1984. 15B. Pp. 299–305.

[28] **Подиновский В.В., Ногин В.Д.** Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Наука, 1982. 254 с.

[29] **Сенькин Е.Н.** Подсистема многокритериальной параметрической оптимизации режущего инструмента // Станки и инструмент. 1989. № 4. С. 15–17.

[30] **Соболь И.М.** Многомерные квадратурные формулы и функции Хаара. М.: Наука, 1969. 288 с.

[31] **Хоменюк В.В.** Элементы теории многоцелевой оптимизации. – М.: Наука, 1983. – 123 с.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**СОКОЛОВ Юрий Алексеевич** – *зам. директора, ПАО "Электромеханика", д-р техн. наук*.
E-mail: s5577@inbox.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0280-0178

## REFERENCES

[1] **A.I. Rudskoy, K.N. Volkov, Yu.A. Sokolov, S.Yu. Kondratyev,** Tsifrovyye proizvodstvennyye sistemy: tekhnologii, modelirovaniye, optimizatsiya. – SPb.: POLITEKh-PRESS, 2020. – 828 s.

[2] **A.I. Rudskoy, K.N. Volkov, S.Yu. Kondratyev, Yu.A. Sokolov,** Fizicheskiye protsessy i tekhnologii polucheniya metallicheskikh poroshkov iz rasplava. – SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2018. – 610 s.

[3] **A.I. Rudskoy, S.Yu. Kondratyev, Yu.A. Sokolov,** Algoritm i tekhnologicheskiye protsessy sinteza poroshkovykh detaley elektronnym luchom v vakuume // Tekhnologiya mashinostroyeniya. 2015. № 1. S. 11–16.

[4] **A.I. Rudskoy, S.Yu. Kondratyev, Yu.A. Sokolov,** Tekhnologiya posloynogo elektronno-luchevogo sinteza poroshkovykh izdeliy v vakuume // Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii. 2014. № 8. S. 40–45.

[5] **S.Y. Kondrat'ev, V.I. Gorynin, V.O. Popov,** Optimization of the parameters of the surface-hardened layer in laser quenching of components // Welding International. – August 2012. – Vol. 26. – No. 8. – Pp. 629–632.

[6] **S.Yu. Kondratyev, M.D. Fuks, M.A. Frolov, S.N. Petrov,** Analiz struktury, fazovogo sostava i mekhanicheskikh svoystv trubnogo svarnogo soyedineniya iz zharoprochnogo splava HP40NbTi // Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov. 2020. № 11 (785). S. 21–31.

[7] Avtomatizirovannoye proyektirovaniye i proizvodstvo v mashinostroyenii / Pod obshch. red. Yu.M. Solomentseva, V.G.Mitrofanova. – M.: Mashinostroyeniye, 1986. – 256 s.

[8] **M. Mesarovich, D. Mako, I. Takakhara,** Teoriya iyerarkhicheskikh mnogourovnevykh sistem. – M.: Mir, 1973. – 344 s.

[9] Teoriya svarochnykh protsessov / Pod red. V.V. Frolova. M.: Vysshaya shkola, 1988. 559 s.

[10] **W. Piekarska, M. Kubiak,** Modeling of thermal phenomena in single laser beam and laser-arc hybrid welding processes using projection method // Applied Mathematical Modelling. 2013. Vol. 37. Pp. 2051–2062.

[11] **S. Wang, R. Nates, T. Pasang, M. Ramezani,** Modelling of gas tungsten arc welding pool under marangoni convection // Universal Journal of Mechanical Engineering. 2015. Vol. 3. Pp. 185–201.

[12] **S. Kou, D.K. Sun,** Fluid flow and weld penetration in stationary arc welds // Metallurgical Transactions A. 1985. Vol. 16. Pp. 203–213.

[13] **S. Kou, Y.H. Wang,** Computer simulation of convection in moving arc weld pools // Metallurgical Transactions A. 1986. Vol. 17. Pp. 2271–2277.

[14] **M.L. Lin, T.W. Eagar,** Pressures produced by gas tungsten arcs // Metallurgical Transactions B. 1986. Vol. 17. Pp. 601–607.

[15] **G.M. Oreper, J. Szekely,** Heat and fluid flow phenomena in weld pool // Journal of Fluid Mechanics. 1984. Vol. 147. P. 63–76.

[16] **M.A. Sholokhov,** Trayektornyye zadachi pri avtomaticheskoy i robotizirovannoy svarke. Metody i algoritmy resheniya, datchiki, programmno-apparatnyye sredstva / Pod red. E.A. Gladkova, R.A. Perkovskogo. – M.: Izdatelstvo MGTU im. N.E. Baumana, 2015. – 168 s.

[17] **G. Buch,** Obyektno-oriyentirovannyy analiz i proyektirovaniye s primerami prilozheniy na C++. Binom, 1998. 720 s.

[18] **Kh. Goma,** UML. Proyektirovaniye sistem realnogo vremeni, parallelnykh i raspredelennykh prilozheniy. M.: DMK Press, 2016. 700 s.

[19] **F. Novikov, D. Ivanov,** Modelirovaniye na UML. Uchebno-metodicheskoye posobiye. SPb.: SPbGU ITMO, 2010. 200 s.

[20] **Dzh. Rambo, M. Blakha,** UML 2.0. Obyektno-oriyentirovannoye modelirovaniye i razrabotka. SPb.: Piter, 2007. 544 s.

[21] **A.N. Krasnov, S.Yu. Sharivker, V.G. Zilberberg,** Nizkotemperaturnaya plazma v metallurgii. M.: Metallurgiya, 1970. 216 s.

[22] Adaptivnoye upravleniye tekhnologicheskimi protsessami / Yu.M. Solomentsev, V.G. Mitrofanov, S.P. Protopopov i dr. M.: Mashinostroyeniye, 1980. 536 s.

[23] **H. Shen, T. Lin, S. Chen, L. Li,** Real-Time Seam Tracking Technology of Welding Robot with Visual Sensing // J. Intell, Robot Syst., 2010, No. 59. – Pp. 283–298.

[24] **S.K. Godunov, S.P. Kiselev, I.M. Kulikov, V.I. Mali,** Modelirovaniye udarnovolnovykh protsessov v uprugoplasticheskikh materialakh na razlichnykh (atomnyy, mezo i termodinamicheskiy) strukturnykh urovnyakh. Izhevsk: Izhevskiy institut kompyuternykh issledovaniy, 2014. 279 s.

[25] **M.K. Vorg, D.A. Lockerby, J.M. Reese,** A Hybrid molecular-continuum method for unsteady compressible multiscale flow // Journal of Fluid Mechanics. 2015. Vol. 768. Pp. 388–414.

[26] **K.K. Abgaryan, Ye.S. Gavrilov, A.M. Marasanov,** Informatsionnaya podderzhka zadach mnogomasshtabnogo modelirovaniya kompozitsionnykh materialov // International Journal of Open Information Technologies. 2017. № 12. S. 24–29.

[27] **J. Goldak, A. Chakravarti, M. Bibby,** A new finite element model for welding heat source // Metallurgical Transactions. B. 1984. 15B. Pp. 299–305.

[28] **V.V. Podinovskiy, V.D. Nogin,** Pareto-optimalnyye resheniya mnogokriterialnykh zadach. M.: Nauka, 1982. 254 s.

[29] **Ye.N. Senkin,** Podsistema mnogokriterialnoy parametricheskoy optimizatsii rezhushchego instrumenta // Stanki i instrument. 1989. № 4. S. 15–17.

[30] **I.M. Sobol,** Mnogomernyye kvadraturnyye formuly i funktsii Khaara. M.: Nauka, 1969. 288 s.

[31] **V.V. Khomenyuk,** Elementy teorii mnogotselevoy optimizatsii. – M.: Nauka, 1983. – 123 s.

## THE AUTHOR

**SOKOLOV Yuriy A.** – *Public Joint Stock Company "Electromekhanika".*
E-mail: s5577@inbox.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0280-0178

**Статья поступила в редакцию 25.03.2022; одобрена после рецензирования 28.03.2022; принята к публикации 28.03.2022.**
**The article was submitted 25.03.2022; approved after reviewing 28.03.2022; accepted for publication 28.03.2022.**

Научная статья
УДК 629.7.023
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.28105

*В.Е. Стрижиус* ✉

Национальный исследовательский университет "МАИ",
Москва, Россия

✉ vitaly.strizhius@gmail.com

# СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ УГЛЕНАНОКОМПОЗИТА ВКУ-18ТР И УГЛЕПЛАСТИКА КМУ-4-2М-3692

*Аннотация.* При модификации углепластиков углеродными наночастицами особое значение приобретает оценка эффективности такой модификации с точки зрения повышения показателей механических свойств по сравнению с аналогом. Особый интерес вызывает сравнение характеристик усталостной прочности модифицированных углепластиков и аналогов, так как именно эти характеристики определяют эксплуатационные качества материалов. Рассмотрены прочностные свойства угленанокомпозита ВКУ-18тр и аналога – углепластика КМУ-4-2м-3692. Отмечено, что детальное сравнение ключевых характеристик усталостной прочности этих пластиков в открытых публикациях отсутствует. С целью проведения такого сравнения выбрано три метода и три вида сравнения: сравнение усталостной долговечности материалов при симметричном цикле нагружения; сравнение усталостной долговечности материалов до достижения определенного уровня деградации остаточной прочности; сравнение усталостной долговечности материалов до достижения определенного уровня деградации жесткости. Несмотря на определенную условность проведенных сравнений отмечено значительное преимущество основных характеристик усталостной прочности угленанокомпозита ВКУ-18тр по сравнению с аналогом – углепластиком КМУ-4-2м-3692. Квоты превосходства достигают значений 125–536%. Очевидно, что подобное преимущество может оказаться крайне важным свойством при проектировании особо ответственных силовых элементов конструкций (например, композитных панелей крыльев самолетов).

*Ключевые слова:* углепластики, углеродные наночастицы, кривые усталости, деградация остаточной прочности, деградация жесткости.

*Для цитирования:*

Стрижиус В.Е. Сравнение характеристик усталостной прочности угленанокомпозита ВКУ-18тр и углепластика КМУ-4-2м-3692 // Материаловедение. Энергетика. 2022. Т. 28, № 1. С. 67–77. DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.28105

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Стрижиус В.Е., 2022. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Scientific article
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.28105

*V.E. Strizhius* ✉

National Research University "Moscow Aviation Institute",
Moscow, Russia

✉ vitaly.strizhius@gmail.com

# COMPARISON OF FATIGUE STRENGTH CHARACTERISTICS OF VKU-18TR CARBON NANOCOMPOSITE AND KMU-4-2M-3692 CARBON FIBER COMPOSITE

*Abstract*. When carbon fiber plastics are modified with carbon nanoparticles, it is particularly important to evaluate the effectiveness of such modification in terms of increasing the mechanical properties compared to the analog. Of particular interest is the comparison of the fatigue strength characteristics of modified carbon fiber plastics and analogs, since it is these characteristics that determine the performance qualities of materials. The strength properties of VKU-18tr carbon nanocomposite and its analog, KMU-4-2m-3692 carbon fiber, are considered. It is noted that there is no detailed comparison of the key fatigue strength characteristics of these plastics in open publications. In order to conduct such a comparison, three methods and three types of comparison were chosen: comparison of the fatigue life of materials with a symmetrical loading cycle; comparison of the fatigue life of materials until a certain level of degradation of residual strength is reached; comparison of the fatigue life of materials until a certain level of degradation of stiffness is reached. Despite the certain conditionality of the comparisons, a significant advantage of the main characteristics of the fatigue strength of the VKU-18tr carbon nanocomposite compared to its analog, KMU-4-2m-3692 carbon fiber, is noted. The superiority quotas reach values of 125–536%. It is obvious that such an advantage can be an extremely important property in the design of particularly critical power elements of structures (for example, composite wing panels of aircrafts).

*Keywords:* carbon fiber plastics, carbon nanoparticles, S-N curves, degradation of residual strength, degradation of stiffness.

*Citation:*

V.E. Strizhius, Comparison of fatigue strength characteristics of VKU-18tr carbon nanocomposite and KMU-4-2m-3692 carbon fiber composite, Materials Science. Power Engineering, 28 (01) (2022) 67–77, DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.28105

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

**Введение.** Известно, что в одним из наиболее эффективных направлений нанотехнологии является разработка наномодифицированных материалов на основе волокнистых армирующих наполнителей и полимерных связующих, содержащих в своем составе нанообъекты. Как правило, такие нанокомпозиты предназначаются для использования в высоконагруженных деталях авиационной, ракетно-космической и других отраслях промышленности.

В случае наномодифицирования конструкционных композитов на основе углеродных армирующих наполнителей наиболее часто используются фуллероидные наночастицы: фуллерены, астралены, нанотрубки [1].

Технология наномодифицирования углепластиков достаточно сложна. Введение углеродных наночастиц в состав связующего производится на стадии приготовления связующего, используемого для изготовления препрега. При воздействии ультразвукового поля наночастицы диспергируются в растворителе, используемом для приготовления связующего, с образованием суспензии.

© V.E. Strizhius, 2022. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Полученная суспензия смешивается с компонентами связующего, доводится до требуемой концентрации компонентов и содержащихся в нем наночастиц. После чего производится пропитка углеродного наполнителя связующим, содержащим наночастицы, затем сушка полученного препрега. Последующие операции изготовления наномодифицированного углепластика остаются без изменений [1].

При модификации углепластиков углеродными наночастицами особое значение приобретает оценка эффективности такой модификации с точки зрения повышения показателей механических свойств по сравнению с аналогом. Особый интерес вызывает сравнение характеристик усталостной прочности, так как именно эти характеристики определяют эксплуатационные качества материалов.

В ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ разработан состав угленанокомпозита, получивший марку ВКУ-18тр [1]. В качестве компонентов для материала ВКУ-18тр были использованы: связующее ЭНФБ-2М, равнопрочная ткань фирмы “Porcer Ind.” артикул 3692 и наночастицы астралена марки NTS в количестве 0,5% от весового содержания отвержденной матрицы.

В качестве аналога этому пластику в работе [1] представлен углепластик КМУ-4-2м-3692 на основе тех же компонентов: связующего ЭНФБ-2М, углеродной ткани артикул 3692, но не содержащий в составе наночастиц астралена.

В работе [1] представлено сравнение некоторых прочностных свойств пластиков ВКУ-18тр и КМУ-4-2м-3692. Однако детальное сравнение *ключевых характеристик усталостной прочности* рассматриваемых пластиков в этой работе отсутствует. В других открытых публикациях по теме наноматериалов (например, в работах [2–3]), такое сравнение также не представлено.

По результатам обзора данных работ [4–10] можно сделать вывод, что в качестве ключевых характеристик усталостной прочности слоистых композитов обычно используются следующие:

1. Усталостная долговечность материалов при симметричном цикле нагружения.
2. Усталостная долговечность материалов до достижения определенного уровня деградации остаточной прочности.
3. Усталостная долговечность материалов до достижения определенного уровня деградации жесткости.

Целью настоящей работы является проведение сравнения таких характеристик для выбранных материалов.

## Методы сравнения характеристик усталостной прочности

***Сравнение усталостной долговечности материалов при симметричном цикле нагружения***

Известно, что кривые усталости материалов являются важнейшим элементом анализа одного из главных аспектов усталостной прочности слоистых композитов – усталостной долговечности. Именно с использованием кривых усталости как правило выполняется сравнение усталостных долговечностей различных материалов.

По результатам обзора и анализа данных, представленных в работах [4, 11–15], можно сделать вывод, что для целого ряда типовых элементов композитных конструкций, работающих в условиях одноосного растяжения-сжатия, могут быть построены «классические» "$\sigma - N$" кривые усталости вида:

$$\sigma_{max} = c + d \lg N, \tag{1}$$

где $\sigma_{max}$ – максимальные нормальные номинальные (в сечении «брутто», средние в пакете слоев) напряжения циклического растяжения-сжатия рассматриваемого образца или элемента; $N$ – усталостная долговечность элемента; $c$ и $d$ – параметры уравнения (1).

По результатам обработки отдельных данных, представленных в работе [1], для циклического нагружения симметричным циклом ($R = -1$) для рассматриваемых пластиков ВКУ-18тр и КМУ-4-2м-3692 могут быть получены следующие уравнения кривых усталости (1) – см. табл. 1.

Таблица 1

**Вид уравнений (1) для рассматриваемых пластиков**

Table 1

**Type of equations (1) for the plastics under consideration**

| Пластик | Уравнение (1) |
|---|---|
| ВКУ-18тр | $\sigma_a^{R=-1} = 1250 - 138,57 \times \lg N$ |
| КМУ-4-2м-3692 | $\sigma_a^{R=-1} = 1150 - 129,71 \times \lg N$ |

Следует отметить, что значение параметра «*c*» в представленных уравнениях равно: $c = \sigma_{UCS}$, где $\sigma_{UCS}$ – предел прочности рассматриваемых пластиков на сжатие.

Графические зависимости $\sigma_a^{R=-1} = f(N)$, построенные для рассматриваемых пластиков с использованием уравнений (1), представлены на рис. 1.

***Сравнение усталостной долговечности материалов до достижения определенного уровня деградации остаточной прочности***

Известно, что деградация остаточной прочности при накоплении усталости в полимерных композиционных материалах (ПКМ) является достаточно неприятной особенностью ПКМ, практически не встречающейся в металлических элементах конструкций. Ввиду этого оценка уровня деградации остаточной прочности ПКМ является обязательной.

Расчетно-экспериментальных оценка уровня деградации остаточной прочности элементов из ПКМ наиболее часто выполняется с использованием *модели деградации нормализованной прочности*.

По результатам обзора и анализа данных, представленных в работах [4–6], можно сформировать следующие основные положения и допущения этой модели.

1. Уровень снижения остаточной прочности в процессе накопления усталости конструктивного элемента из ПКМ зависит от конструктивно-технологических особенностей рассматриваемого элемента (типа ПКМ, параметров укладки, толщины, типа концентратора напряжения и т.д.), механических и усталостных характеристик рассматриваемого элемента. В работах [4–6] делается допущение, что механические и усталостные характеристики при одноосном растяжении элемента могут быть связаны зависимостью:

$$t^a + s^b = 1, \tag{2}$$

где $t = (\lg n - \alpha)/(\lg N - \alpha)$ – функция нагружения; $n$ – количество циклов нагружения при уровне максимальных напряжений цикла $\sigma_{\max}$; $N$ – количество циклов нагружения до разрушения рассматриваемого элемента при уровне напряжений $\sigma_{\max}$; $\alpha$ – константа, $\alpha = \lg(0,25) = -0,6021$; $s = (\sigma_{RS} - \sigma_{\max})/(\sigma_{UTS} - \sigma_{\max})$ – относительная остаточная прочность элемента из ПКМ; $\sigma_{RS}$ – остаточная прочность элемента из ПКМ; $\sigma_{UTS}$ – предел прочности рассматриваемого элемента при растяжении; $a$ и $b$ – параметры, зависящие от свойств материала и окружающей среды.

2. На основе зависимости (2) в работах [4–6] получено соотношение для оценки остаточной прочности рассматриваемого элемента в процессе накопления усталости:

$$\sigma_{RS} = \left(\sigma_{UTS} - \sigma_{\max}\right)\left(1 - t^a\right)^{\frac{1}{b}} + \sigma_{\max}$$

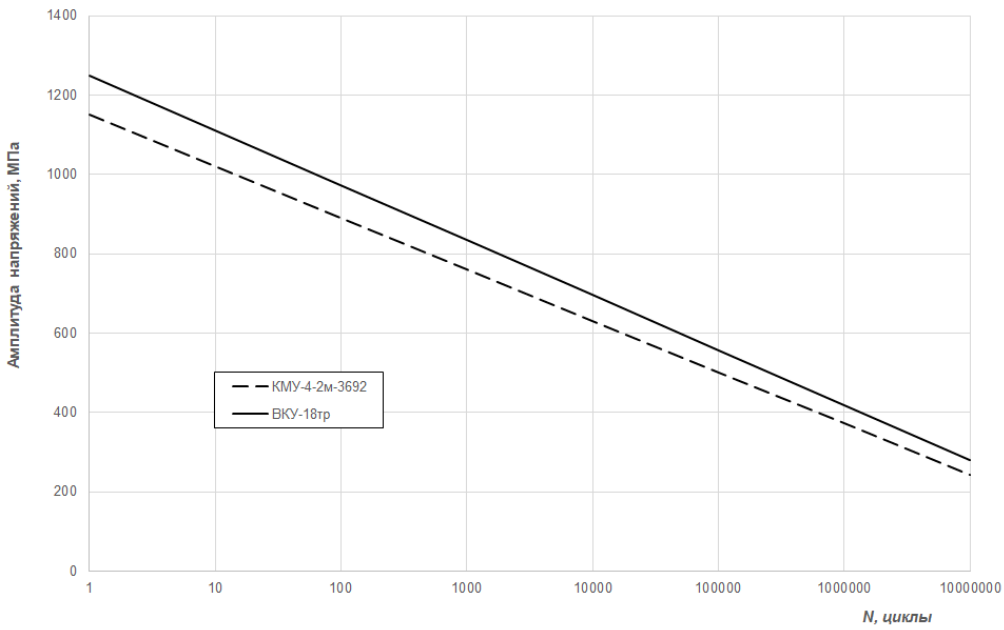


Рис. 1. Кривые усталости пластиков ВКУ-18тр и КМУ-4-2м-3692
Fig. 1. *S-N* curves for the plastics ВКУ-18тр and КМУ-4-2м-3692

или

$$\sigma_{RS} = \left(\sigma_{UTS} - \sigma_{\max}\right)\left(1 - \left(\frac{\lg(n) - \alpha}{\lg(N) - \alpha}\right)^{a}\right)^{\frac{1}{b}} + \sigma_{\max}. \quad (3)$$

По данным работы [4] параметры $a$ и $b$ для пластиков типа CFRP (пластик, армированный углеродным волокном), KFRP (пластик, армированный кевларовым волокном) и GRP (пластик, армированный стекловолокном) принимают значения, близкие к значениям, представленным в табл. 2.

Таблица 2

**Значения параметров *a* и *b* для пластиков типа CFRP, KFRP и GRP (по данным работы [4])**

Table 2

**Values of parameters *a* and *b* for plastics of the type CFRP, KFRP and GRP (according to the data of [4])**

| Тип пластика | *a* | *b* |
|---|---|---|
| CFRP | 1,8 | 23,1 |
| KFRP | 1,8 | 5,2 |
| GRP | 1,5 | 4,8 |

Очевидно, что значения параметров $a$ и $b$ будут оказывать значительное влияние на форму кривой снижения остаточной прочности "$\sigma_{RS} - N$" и получаемые с использованием этой кривой конечные результаты оценок остаточной прочности. Поэтому с целью получения достаточно до-

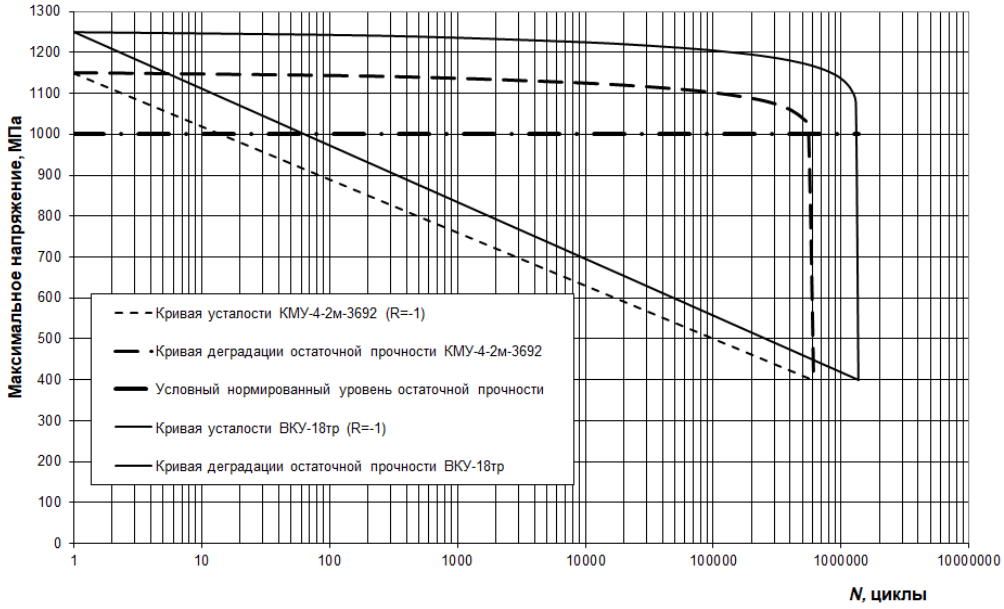


Рис. 2. Графические зависимости (1) и (3) для пластиков ВКУ-18тр и КМУ-4-2м-3692

Fig. 2. Graphical dependencies (1) and (3) for the plastics ВКУ-18тр and КМУ-4-2м-3692

стоверных результатов таких оценок для каждого рассматриваемого элемента из ПКМ значения параметров $a$ и $b$ должны уточняться по результатам специально проведенных испытаний.

Графические зависимости $\sigma_{RS} = f(N)$, построенные для рассматриваемых пластиков с использованием зависимости (3) при *условном уровне* циклических напряжений $\sigma_a^{R=-1} = 400$ МПа, представлены на рис. 2.

При построении зависимостей принято допущение, что для рассматриваемых пластиков могут быть приняты значения параметров $a$ и $b$, указанные в табл. 2 для углепластиков (CFRP).

***Сравнение усталостной долговечности материалов до достижения определенного уровня деградации жесткости***

Известно, что деградация жесткости при накоплении усталости в слоистых композитах также является достаточно неприятным свойством ПКМ. Жесткость является одной из ключевых характеристик как статической, так и усталостной прочности ПКМ, поэтому необходимость анализа процесса деградации жесткости в процессе накопления усталости очевидна. Следует также отметить, что остаточная жесткость очень часто используется как «неразрушающая» мера оценки повреждения ПКМ.

Расчетно-экспериментальных оценка уровня деградации жесткости элементов из ПКМ наиболее часто выполняется с использованием *модели деградации нормализованной жесткости*.

По результатам обзора и анализа данных, представленных в работах [5–6], можно сформировать следующие основные положения такой модели.

1. Остаточная жесткость композиционного материала также, как и остаточная прочность, является функцией уровня и числа циклов приложенных напряжений.

2. Для представления остаточной жесткости как функции числа циклов в работах [5–6] предложено следующее уравнение:

$$E(n) = \left(E_s - \frac{\sigma}{\varepsilon_f}\right) \times \left(1 - \left(\frac{\lg(n) - \lg(0.25)}{\lg(N_f) - \lg(0.25)}\right)^{\lambda}\right)^{\frac{1}{\gamma}} + \frac{\sigma}{\varepsilon_f}, \qquad (4)$$

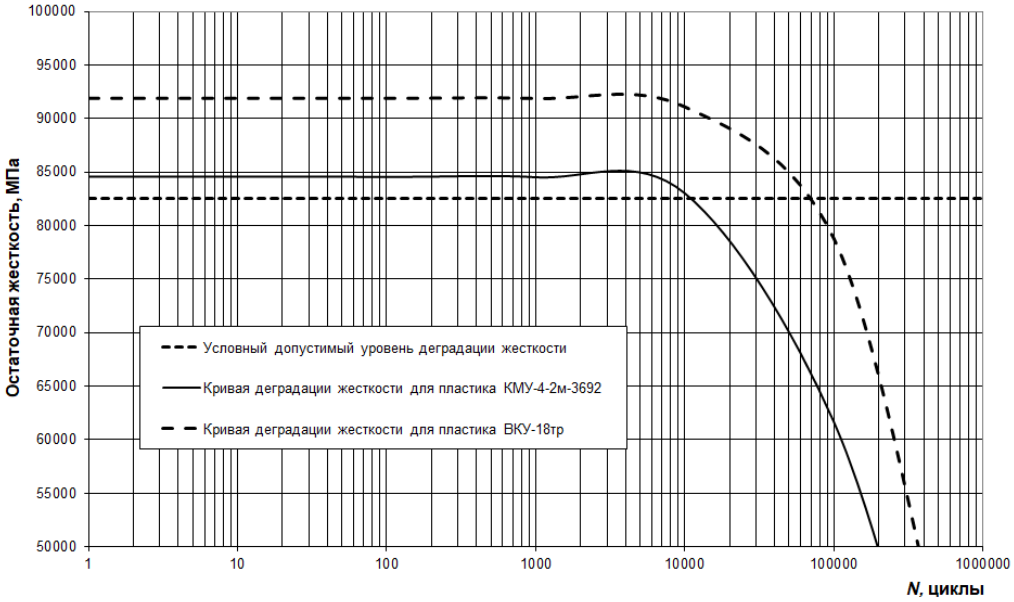


Рис. 3. Графические зависимости (4) для пластиков ВКУ-18тр и КМУ-4-2м-3692
Fig. 3. Graphical dependencies (4) for the plastics ВКУ-18тр and КМУ-4-2м-3692

где $E(n)$ – остаточная жесткость; $E_s$ – начальная (статическая) жесткость; σ – величина прикладываемых напряжений; $\varepsilon_f$ – средняя деформация при статическом разрушении; $n$ – число приложенных циклов; $N_f$ – усталостная долговечность (число циклов до разрушения) при уровне напряжений σ; λ и γ – экспериментальные параметры.

Графические зависимости $E(n) = f(n)$ для рассматриваемых пластиков получены с использованием соотношения (4) и представлены на рис. 3.

При построении зависимостей приняты некоторые допущения и использованы следующие уравнения и значения:

1. $\varepsilon_f = 0{,}0136$ – средняя деформация при статическом разрушении – значение принято на основании данных работы [6].

2. $E_s = \dfrac{\sigma_{UCS}}{\varepsilon_f} = \dfrac{1250}{0{,}0136} =$ 91912 МПа – начальная (статическая) жесткость лля пластика ВКУ-18тр.

3. $E_s = \dfrac{\sigma_{UCS}}{\varepsilon_f} = \dfrac{1150}{0{,}0136} =$ 84559 МПа – начальная (статическая) жесткость лля пластика КМУ-4-2м-3692.

4. $\sigma_a^{R=-1} = 400$ МПа – *условный уровень* циклических напряжений.

5. Значения $N_f$ определяются с использованием уравнений кривых усталости, представленных в табл. 1.

6. $\lambda = 14{,}57$ и $\gamma = 0{,}3024$ – значения параметров λ и γ – приняты на основании данных работы [6].

7. 82500 МПа – условный допустимый уровень деградации жесткости.

## Результаты

Кривые усталости для рассматриваемых пластиков, построенные с использованием уравнений (1) (см. табл. 1) представлены на рис. 1. Результаты сравнения усталостных долговечностей пластиков при условном уровне циклических напряжений $\sigma_a^{R=-1} = 400$ МПа представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Сравнительные свойства усталостной прочности пластиков КМУ-4-2м-3692 и ВКУ-18тр**

Table 3

**Comparative properties of fatigue strength of plastics КМУ-4-2м-3692 and ВКУ-18тр**

| Свойство (усталостная долговечность) | КМУ-4-2м-3692 | ВКУ-18тр | Квоты превосходства пластика ВКУ-18тр, % |
|---|---|---|---|
| $N$, циклы | 605520 | 1361700 | 125 |
| $N_{RS}$, циклы | 550000 | 1300000 | 136 |
| $N_{RE}$, циклы | 11000 | 70000 | 536 |

Графические зависимости $\sigma_{RS} = f(N)$ для рассматриваемых пластиков при условном уровне циклических напряжений $\sigma_a^{R=-1} = 400$ МПа получены с использованием соотношения (3) и представлены на рис. 2. Результаты сравнения усталостных долговечностей пластиков до достижения условного уровня остаточной прочности $\sigma_{RS} = 1000$ МПа представлены в табл. 3

Графические зависимости $E(n) = f(n)$ для рассматриваемых пластиков, построенные с использованием соотношения (4) при условном уровне циклических напряжений $\sigma_a^{R=-1} = 400$ Мпа, представлены на рис. 3. Результаты сравнения усталостных долговечностей пластиков до достижения условного допустимого уровня деградации жесткости 82500 МПа представлены в табл. 3.

## Обсуждение результатов

Не смотря на определенную условность проведенных сравнений можно отметить значительной преимущество основных характеристик усталостной прочности угленанокомпозита ВКУ-18тр по сравнению с аналогом – углепластиком КМУ-4-2м-3692. Квоты превосходства достигают значений 125–536%.

Очевидно, что подобное преимущество может оказаться крайне важным при проектировании особо ответственных силовых элементов конструкций (например, композитных панелей крыльев самолетов).

Однако следует отметить, что при внедрении угленанокомпозитов в реальные конструкции следует особенно тщательно учитывать проблемы технологии производства и стоимость подобных пластиков. Вполне возможно, что эти аспекты могут оказать негативное слияние на широкое внедрение нанокомпозитов в производство элементов конструкций.

## Заключение

Рассмотрены некоторые прочностные свойства угленанокомпозита ВКУ-18тр и аналога – углепластика КМУ-4-2м-3692. Отмечено, что детальное сравнение ключевых характеристик усталостной прочности этих пластиков в открытых публикациях отсутствует.

С целью проведения такого сравнения выбрано три метода и вида сравнения: сравнение усталостной долговечности материалов при симметричном цикле нагружения; сравнение усталостной долговечности материалов до достижения определенного уровня деградации остаточной прочности; сравнение усталостной долговечности материалов до достижения определенного уровня деградации жесткости.

Не смотря на определенную условность проведенных сравнений можно отметить значительной преимущество основных характеристик усталостной прочности угленанокомпозита ВКУ-18тр по сравнению с аналогом – углепластиком КМУ-4-2м-3692. Квоты превосходства достигли значений 125–536%.

Отмечено, что подобное преимущество может оказаться крайне важным при проектировании особо ответственных силовых элементов конструкций (например, композитных обшивок крыльев самолетов).

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Гуняев Г.М., Чурсова Л.В., Комарова О.А., Раскутин А.Е., Гуняева А.Г.** Конструкционные полимерные угленанокомпозиты – новое направление материаловедения // Электронный научно-технический журнал «Труды ВИАМ». ВИАМ/2011-205794, апрель 2011 г.

[2] **Пономарев А.Н.** Нанотехнология и наноструктурные материалы // Индустрия. 2002. № 1. С. 12.

[3] **Гуняев Г.М., Комарова О.А., Ильченко С.И., Алексашин В.М., Пономарев А.Н., Деев И.С., Никитин В.А.** Фуллероидные наноматериалы – активные структурные модификаторы полимеров и полимерных композитов // Пластические массы. 2003. № 10. С. 15.

[4] **Harris B.** A historical review of the fatigue behavior of fiber-reinforced plastics, Fatigue in composites, Ed. by B. Harris. – Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC, 2003.

[5] **Shokrieh M.M., Lessard L.B.** Fatigue under multiaxial stress systems, Fatigue in composites, Ed. by B. Harris. – Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC, 2003.

[6] **Khan A.I., Venkataraman S., Miller I.** Predicting Fatigue Damage of Composites Using Strength Degradation and Cumulative Damage Model, J. Compos. Sci., 2 (2018).

[7] **Scherban K.S., Zakharenkova A.Yu., Konovalov V.V., Kulikov S.V., Strizhius V.E.** Full-Scale Fatigue and Residual Strength Tests of the Composite Wing Box of a Passenger Aircraft, 30th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue, ICAF 2019, Krakow, Poland, June 2-7 2019, Proceedings, Krakow, 2019.

[8] **Захаренкова А.Ю., Коновалов В.В., Куликов С.В., Стрижиус В.Е., Федотов М.А., Щербань К.С., Яшутин А.Г.** Испытания на усталость и остаточную прочность композитного кессона крыла пассажирского самолета // Ученые записки ЦАГИ. 2019. Т. I. № 3. С. 61–73.

[9] **Стрижиус В.Е.** Методика комплексной расчетной оценки усталостной долговечности элементов композитных авиаконструкций // Научный вестник МГТУ ГА. 2020. Т. 23. № 2. С. 59–71.

[10] **Тудупова А.Н., Стрижиус В.Е., Бобрович А.В.** Расчетно-экспериментальная оценка ресурсных характеристик композитных панелей крыла самолета транспортной категории // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 4. С. 21–27.

[11] **Mandell J.F.** Fatigue behaviour of fibre-resin composites, Developments in Reinforced Plastics 2 (editor Pritchard G.), (Applied Science Publishers, London), 1986, Pp. 67–108.

[12] **Nijssen R.P.L.** Phenomenological fatigue analysis and life modelling, Fatigue life prediction of composites and composite structures, Ed. by Anastasios P. Vassilopoulos. – Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, 2010.

[13] **Burhan I., Kim H.S.** S-N Curve Models for Composite Materials Characterisation: An Evaluative Review, J. Compos. Sci., 2(38) (2018).

[14] **Strizhius V.E.** Fatigue life prediction of CFRP laminate under quasi-random loading, 30th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue, ICAF 2019, Krakow, Poland, June 2-7 2019, Proceedings, Krakow, 2019.

[15] **Strizhius V.E.** Fatigue life prediction of laminated composites using normalized S-N data, Materials Science. Power Engineering, 26(03) (2020) 20–32.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**СТРИЖИУС Виталий Ефимович** – *профессор, Национальный исследовательский университет "МАИ", д-р техн. наук.*
E-mail: vitaly.strizhius@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7575-7425

## REFERENCES

[1] **G.M. Gunyaev, L.V. Chursova, O.A. Komarova, A.E. Raskutin, A.G. Gunyaeva A.G.,** Structural polymer carbon nanocomposites – a new direction of materials science, Electronic scientific and technical journal "Proceedings of VIAM", VIAM/2011-205794, (2011).

[2] **A.N. Ponomarev,** Nanotechnology and nanostructured materials, Industry, 1 (2002) 12.

[3] **G.M. Gunyaev, O.A. Komarova, S.I. Ilchenko, V.M. Aleksashin, A.N. Ponomarev, I.S. Deev, V.A. Nikitin,** Fulleroid nanomaterials – active structural modifiers of polymers and polymer composites, Plastic masses, 10 (2003) 15.

[4] **B. Harris,** A historical review of the fatigue behavior of fiber-reinforced plastics, Fatigue in composites, Ed. by B. Harris. – Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC, 2003.

[5] **M.M. Shokrieh, L.B. Lessard,** Fatigue under multiaxial stress systems, Fatigue in composites, Ed. by B. Harris. – Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC, 2003.

[6] **A.I. Khan, S. Venkataraman, I. Miller,** Predicting Fatigue Damage of Composites Using Strength Degradation and Cumulative Damage Model, J. Compos. Sci., 2 (2018).

[7] **K.S. Scherban, A.Yu. Zakharenkova, V.V. Konovalov, S.V. Kulikov, V.E. Strizhius,** Full-Scale Fatigue and Residual Strength Tests of the Composite Wing Box of a Passenger Aircraft, 30th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue, ICAF 2019, Krakow, Poland, June 2-7 2019, Proceedings, Krakow, 2019.

[8] **A. Zakharenkova, V.V. Konovalov, S.V. Kulikov, V.E. Strizhius, M.A. Fedotov, K.S. Shcherban, A.G. Ashutin,** Fatigue and the residual strength test of a composite wing box of a passenger aircraft, Uchenye Zapiski TSAGI, I(3) (2019) 61–73.

[9] **V.E. Strizhius,** Method of complex estimation of the fatigue life of composite elements aviation structure, Scientific Bulletin of MGTU CA, 23 (2) (2020) 59–71.

[10] **A.N. Tulupova, V.E. Strizhius, A.V. Bobrovich,** Computational and experimental evaluation of fatigue characteristics of composite panels of a transport category aircraft wing, Bulletin of the Moscow Aviation Institute, 27(4) (2020) 21–27.

[11] **J.F. Mandell,** Fatigue behaviour of fibre-resin composites, Developments in Reinforced Plastics 2 (editor Pritchard G.), (Applied Science Publishers, London), 1986, Pp. 67–108.

[12] **R.P.L. Nijssen,** Phenomenological fatigue analysis and life modelling, Fatigue life prediction of composites and composite structures, Ed. by Anastasios P. Vassilopoulos. – Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, 2010.

[13] **I. Burhan, H.S. Kim,** S-N Curve Models for Composite Materials Characterisation: An Evaluative Review, J. Compos. Sci., 2 (38) (2018).

[14] **V.E. Strizhius,** Fatigue life prediction of CFRP laminate under quasi-random loading, 30th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue, ICAF 2019, Krakow, Poland, June 2-7 2019, Proceedings, Krakow, 2019.

[15] **V.E. Strizhius,** Fatigue life prediction of laminated composites using normalized S-N data, Materials Science. Power Engineering, 26 (03) (2020) 20–32.

## THE AUTHOR

**STRIZHIUS Vitaly E.** – *National Research University "Moscow Aviation Institute".*
E-mail: vitaly.strizhius@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7575-7425

**Статья поступила в редакцию 05.03.2022; одобрена после рецензирования 10.03.2022; принята к публикации 23.03.2022.**
**The article was submitted 05.03.2022; approved after reviewing 10.03.2022; accepted for publication 23.03.2022.**

Научное издание

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. ЭНЕРГЕТИКА**

**Том 28, № 1, 2022**

Учредитель — Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства
в сфере массовых коммуникаций и охраны культурного наследия
(свидетельство о регистрации СМИ ЭЛ № ФС 77-78004 от 27.03.2020 г.)

Ответственный секретарь — *О.А. Матенев*

Компьютерная верстка *А.А. Кононовой*

Телефон редакции (812) 294-22-86

E-mail: ntv-nauka@spbstu.ru

Подписано в печать 31.03.2022.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

## УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛЕ "МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. ЭНЕРГЕТИКА"

**(ранее «Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки»)**

### 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Журнал «Материаловедение. Энергетика» является периодическим печатным научным рецензируемым изданием:

зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (Свидетельство о регистрации СМИ от 27.03.2020 г. ЭЛ № ФС 77-78004);

имеет международный стандартный номер сериального периодического издания (ISSN 2687-1300);

внесен Высшей аттестационной комиссией Минобразования РФ в Перечень периодических научных и научно-технических изданий, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора наук и кандидата наук;

с 2005 г. входит в национальную информационно-аналитическую систему «Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)»;

сведения о публикациях представлены в Реферативном журнале ВИНИТИ РАН и включены в фонд научно-технической литературы (НТЛ) ВИНИТИ РАН, в Научной электронной библиотеке «КиберЛенинка», в международную библиографическую и реферативную базу данных ProQuest, международную наукометрическую базу Index Copernicus, Google Scholar, международную систему по периодическим изданиям «Ulrich's Periodicals Directory», представлены на платформе Web of Science в виде отдельной базы данных Russian Science Citation Index (RSCI), EBSCO, CNKI, ROAD.

Журнал публикует результаты работ в следующих областях науки и техники: энергетика, электротехника, материаловедение, металлургия.

Редакция журнала соблюдает права интеллектуальной собственности и со всеми авторами научных статей заключает издательский лицензионный договор.

Публикация материалов, в том числе соискателей ученых степеней, осуществляется бесплатно.

### 2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДСТАВЛЯЕМЫМ МАТЕРИАЛАМ

#### 2.1. Представление материалов

В статье должны быть кратко изложены новые и оригинальные результаты исследований, полученные авторами; следует избегать повторений, излишних подробностей и известных положений, подробных выводов формул и уравнений (приводить лишь окончательные формулы, пояснив, как они получены).

При написании оригинальной научной статьи и оформлении рукописи авторы должны придерживаться следующих правил.

Статья должна представлять собой описание выполненных исследований с указанием их места в соответствующей области наук и обсуждением значения выполненной работы. Рукопись должна содержать достаточное количество информации и ссылок на общедоступные источники для того, чтобы работа могла быть повторена независимо от авторов.

Название статьи должно быть кратким, но информативным. Обращаем внимание на то, что журнал издается как на русском, так и на английском языке. В связи с этим не следует использовать аббревиатуру в названии статьи.

Аннотация должна давать читателю сжатую информацию о содержании статьи, быть информативной и отражать не только основные цели статьи, но и главные результаты и выводы работы. Аннотация не является частью текста и сама по себе должна быть законченным описанием.

Ключевые слова должны отражать основную проблематику статьи; они приводятся на русском языке для русской и на английском для англоязычной версии статьи. Количество ключевых слов – не менее трех и не более семи.

Адрес для корреспонденции должен содержать фамилию автора для корреспонденции (не обязательно первого автора), его полный почтовый адрес, телефон, факс, e-mail.

При необходимости Редколлегия может потребовать представления Акта экспертизы.

Представление всех материалов осуществляется в электронном виде через личный кабинет ЭЛЕКТРОННОЙ РЕДАКЦИИ по адресу: http://journals.spbstu.ru

Статьи подаются в формате .docx (MS Word 2007–2010). Файл статьи, подаваемый через электронную редакцию, должен содержать только сам текст, без названия, списка литературы, фамилий и данных авторов. Список литературы, название статьи, вся информация об авторах задаются при подаче через электронную редакцию в отдельных полях. В тексте статьи должны быть ссылки на все источники из списка литературы. Порядковый номер источника в тексте статьи указывается в квадратных скобках.

#### 2.2. Оформление материалов

2.2.1. Объем статей, как правило, 15–20 страниц формата А-4. Количество рисунков и фотографий (в том числе цветных) не должно превышать 4, таблиц – 3.

2.2.2. Число авторов – не более трех от одной организации и не более пяти от разных организаций. Статья должна быть подписана всеми авторами. Авторами являются лица, принимавшие участие во всей работе или ее главных разделах. Лица, участвовавшие в работе частично, указываются в сносках.

2.2.3. Статья должна содержать следующие разделы:

номер УДК в соответствии с классификатором;

фамилии авторов на русском и английском языках;

название на русском и английском языках;

аннотации – не менее 100 слов на русском и английском языках;

ключевые слова – не менее 3 и не более 7 на русском и английском языках;

введение (актуальность, краткое обоснование существующей проблемы) – 1,0–1,5 стр.;

цель работы (краткая четкая формулировка поставленной задачи);

методика проведения исследований и расчетов, включая краткую информацию об использованных приборах, методах и точности экспериментальных измерений и теоретических расчетов и т. д.