

ВЕСТНИК

Белорусско-Российского университета

*Научно-методический журнал
Издается с октября 2001 г.*

Периодичность – 4 раза в год

3(80) 2023

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

БРАНОВИЦКИЙ А. М. Водное аналоговое моделирование процессов заполнения расплавом металла литейной формы при литье под давлением.....	6
ДОВГАЛЕВ А. М., СВИРЕПА Д. М., ТАРАДЕЙКО М. В., ТАРАДЕЙКО И. А., МАЛИНОВСКИЙ Н. Ю. Математическое моделирование процесса модифицирования наружных цилиндрических поверхностей деталей импульсно-ударным накатыванием и вращающимся магнитным полем.....	16
КУЗМЕНКО И. М., ПОПКОВСКИЙ В. А., КРИЖЕВСКИЙ А. Д. Сопротивление разрушению консольной балки с краевой трещиной на поверхности.....	26
КУЦЕПОЛЕНКО А. В., ПОДЫМАКО М. Э., ЗАЯЦ Е. Н. Современные тенденции в дизайне панорамного лифта.....	35
ЛУСТЕНКОВ М. Е., ШЕМЕНКОВ В. М., САСКОВЕЦ К. В., МОИСЕЕНКО А. Н. Технологии изготовления центральных колес передачи с плоско-коническим зацеплением.....	48
ЛУСТЕНКОВА Е. С. Определение углов подъема беговых дорожек сферических роликовых передач.....	57

ЛУСТЕНКОВА Е. С., ЗЫЛЬ С. А. Моделирование работы синусошариковой передачи в системе Siemens NX.....	66
ПАШКЕВИЧ В. М., ПОПКОВСКИЙ В. А., АФАНЕВИЧ В. В., ТЮРИНА А. В. Моделирование процесса наклепа поверхности при управляемой инерционно-импульсной обработке изделий из высокопрочного чугуна.....	76
ПРУДНИКОВ А. П. Механизм выравнивания нагрузки между телами качения планетарной цевочной передачи типа К-Н-V.....	85
СИМАНОВИЧ Н. М., ОСТРИКОВ О. М., КУЛЬГЕЙКО М. П. Изменение конфигурации полей напряжений в области серповидного двойника в зависимости от направления действия внешней тангенциальной распределенной нагрузки.....	95
ТАРАСИК В. П. Вероятностные оценки процессов функционирования гидромеханической трансмиссии карьерного самосвала.....	104
ШЕМЕНКОВ В. М., РАБЫКО М. А., ШЕМЕНКОВ В. В. Влияние прикатодного магнитного поля на эффективность процесса упрочнения тлеющим разрядом штамповой стали 4Х4ВМФС.....	115

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ЛАРЬКИНА Т. С., ЛЕНЕВСКИЙ Г. С. Анализ работы инверторов, используемых в системах индукционного нагрева, при помощи MATLAB.....	126
ЛЕНЕВСКИЙ Г. С., СИНЮКОВИЧ А. А., ШНИП Д. В. Разработка нового испытательного оборудования для продукции LLC «NOVUS INDUSTRY» на электрооборудовании ПО «ОВЕН».....	134

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

БОЛОТОВ С. В., ЗАХАРЧЕНКОВ К. В., КУЛИКОВ В. П. Автоматизированная система контроля качества дуговой сварки.....	144
СИНИЦА А. Н., КУЛИКОВ В. П., СИНИЦА М. А. Ультразвуковой контроль осей трамвайных вагонов дефектоскопом УД2-102 «ПЕЛЕНГ».....	153

**ОХРАНА ТРУДА. ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.
ЭКОЛОГИЯ**

**ЩУР А. В., АЛЕКСАНДРОНЕЦ А. А., РОМАНОВ М. В.,
ЧУСОВ А. Н.** Устройство по очистке воздуха жилых и офисных
помещений..... 161

ЭКОНОМИКА. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

КОМАРОВА С. Л., МИЛЬКО В. Д. Оценка конкурентоспособности
подразделений организации методом бенчмаркинга с использованием
разработанного программного продукта..... 168

- *Журнал включен в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам*
- *Публикуемые материалы рецензируются*
- *Подписные индексы: для индивидуальных подписчиков – 00014
для предприятий и организаций – 000142*

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING

BRANOVITSKY A. M. Water analogue modeling of processes of filling a casting mold with metal melt during die casting.....	6
DOVGALEV A. M., SVIREPA D. M., TARADEIKO M. V., TARADEIKO I. A., MALINOVSKY N. Y. Mathematical modeling of the process of modifying external cylindrical surfaces of parts by using impulse-impact rolling and a rotating magnetic field.....	16
KUZMENKO I. M., POPKOVSKY V. A., KRIZHEVSKY A. D. Fracture resistance of a cantilever beam with an edge crack on the surface.....	26
KUTSEPOLENKO A. V., PODYMAKO M. E., ZAYATS E. N. Modern trends in panoramic elevator design.....	35
LUSTENKOV M. E., SHEMENKOV V. M., SASKOVETS K. V., MOISEENKO A. N. Technologies for manufacturing central gears of transmissions with flat bevel gearing.....	48
LUSTENKOVA E. S. Determination of ascent angles of race tracks in spherical roller transmissions.....	57
LUSTENKOVA E. S., ZYL S. A. Simulation of sinus-ball transmission operation in Siemens NX system.....	66
PASHKEVICH V. M., POPKOVSKY V. A., AFANEVICH V. V., TYURINA A. V. Modeling the process of surface hardening during controlled inertial pulse processing of high strength cast iron products.....	76
PRUDNIKOV A. P. Mechanism for leveling load distribution between rolling bodies of KHV-type planetary lantern gearing	85
SIMANOVICH N. M., OSTRIKOV O. M., KULGEYKO M. P. Changing the configuration of stress fields in the crescent-shaped twin region depending on the direction of external tangential distributed load action.....	95
TARASIK V. P. Probabilistic evaluation of processes related to functioning of the hydromechanical transmission of mining dump trucks.....	104
SHEMENKOV V. M., RABYKO M. A., SHEMENKOV V. V. Influence of the cathode magnetic field on the efficiency of the process of glow discharge strengthening of 4X4VMFS stamped steel	115

ELECTRICAL ENGINEERING

LARKINA T. S., LENEVSKY G. S. Analysis of the operation of inverters in induction heating systems using MATLAB..... 126

LENEVSKY G. S., SINIUKOVICH A. A., SHNIP D. V. Developing new testing equipment for OOO NOVUS INDUSTRY products based on electrical equipment produced by OOO OVEN..... 134

INSTRUMENT MAKING

BOLOTOV S. V., ZAKHARCHENKOV K. V., KULIKOV V. P. Automated arc welding quality control system..... 144

SINITSA A. N., KULIKOV V. P., SINITSA M. A. Ultrasonic inspection of tramway car axles with UD2-102 PELENG flaw detector..... 153

LABOUR PROTECTION. ENVIRONMENT PROTECTION. ECOLOGY

SHCHUR A. V., ALEXANDRONETS A. A., ROMANOV M. V., CHUSOV A. N. Air purification device for residential and office premises..... 161

ECONOMICS. ECONOMIC SCIENCES

KOMAROVA S. L., MILKO V. D. Assessment of competitiveness of organization subdivisions through the benchmarking method using the software product developed..... 168

МАШИНОСТРОЕНИЕ

DOI: 10.53078/20778481_2023_3_6

УДК 624.74.01

А. М. БРАНОВИЦКИЙ, канд. техн. наук

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ВОДНОЕ АНАЛОГОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАПОЛНЕНИЯ РАСПЛАВОМ МЕТАЛЛА ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЫ ПРИ ЛИТЬЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Аннотация

В работе приведены результаты водного аналогового моделирования процесса заполнения литейной формы металлическим расплавом при литье под давлением. Разработана установка и программное обеспечение для моделирования процессов литья, которые позволяют воспроизвести трехмерную картину заполнения литейной формы и могут использоваться для верификации численных моделей заполнения литейной формы, а также для разработки и оптимизации технологических процессов литья и конструкции литниковой системы.

Ключевые слова:

водное аналоговое моделирование, литье под давлением, литейная форма, металлический расплав.

Для цитирования:

Брановицкий, А. М. Водное аналоговое моделирование процессов заполнения расплавом металла литейной формы при литье под давлением / А. М. Брановицкий // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 3 (80). – С. 6–15.

Процесс заполнения литейной формы при литье под давлением является достаточно сложным, и для его исследования, наряду с численным математическим моделированием, широко используется водное аналоговое моделирование [1–7] с целью:

– верификации численных моделей и различных методов моделирования течения потока металлического расплава при заполнении литейной формы;

– конструирования литниковой системы и определения технологических параметров процесса литья, позволяющих избежать дефектов, вызванных некачественным заполнением литейной формы;

– оптимизации технологических и конструктивных параметров процесса литья.

Широкое применение водное ана-

логовое моделирование получило при проектировании процессов литья под давлением металлических сплавов, когда заполнение формы происходит со скоростью до 50 м/с.

Наряду с водным аналоговым моделированием, известны следующие способы регистрации процесса заполнения литейной формы:

– регистрация профиля расплава с использованием высокоскоростной рентгеноскопии (данный метод обладает такими недостатками, как ограниченность проникновения рентгеновских лучей в металле и высокая стоимость оборудования и обеспечения безопасности персонала) [7];

– размещение внутри литейной формы электрических контактов, при прохождении металла контакты замыкаются, регистрируя расположение рас-

плава (к недостаткам данного метода можно отнести зависимость точности регистрации от числа контактов и влияние электрических контактов на течение расплава) [8–10].

Метод водного аналогового моделирования успешно применяется для верификации численных моделей с использованием SPH-метода (smoothed particle hydrodynamics method – метод гидродинамики сглаженных частиц), который является эффективным бессеточным лагранжевым методом и в настоящее время широко применяется для моделирования потока жидкости с неизвестной свободной границей [1].

Установка для водного аналогового моделирования

Для водного аналогового моделирования процесса заполнения литейной

формы разработана установка [4–7] (рис. 1 и 2), основными компонентами которой являются:

- система создания необходимого давления жидкости с микропроцессорным блоком управления;
- прозрачная акриловая форма для моделирования;
- синхронизированные видеокамеры;
- система освещения;
- четыре системных компьютерных блока с установленными платами видеозахвата Data Translation 3120;
- ПК для управления установкой.

Для захвата и записи изображений с видеокамер использовались четыре персональных компьютера и платы видеозахвата Data Translation 3120, компьютеры управлялись по локальной сети посредством удаленного доступа.



Рис. 1. Установка для водного аналогового моделирования процессов литья под давлением

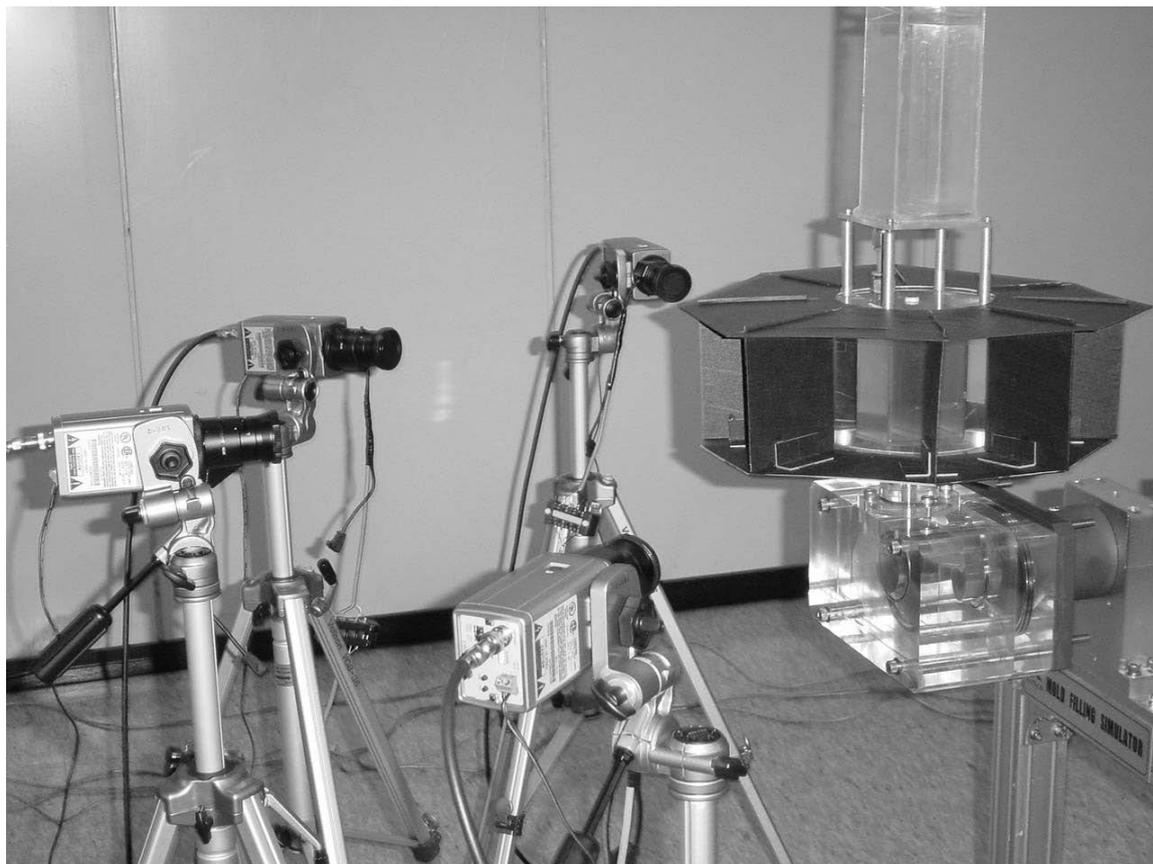


Рис. 2. Вид установки для водного аналогового моделирования процесса заполнения формы с четырьмя видеокамерами

Для регистрации изображений использовали четыре аналоговые цветные CCD-видеокамеры Samsung SCC 131A с возможностью внешней синхронизации от сети переменного тока (line-lock), со скоростью затвора $1/60 \dots 1/100000$ и объективами с переменным фокусным расстоянием $5 \dots 50$ мм. Режим синхронизации line-lock использовался для одновременного захвата изображений с видеокамер. Для одновременного старта захвата изображений использовали триггерное устройство, TTL-сигнал с которого подавался на триггерные входы плат видеозахвата. Для монтажа видеокамер использовали штативы.

Для задач проектирования процесса литья использовали точную копию литейной формы, изготовленную из прозрачного пластика акрила (рис. 3).

Для улучшения возможностей регистрации потока жидкости при моделировании воду окрашивали. Водное аналоговое моделирование позволяет обнаружить дефекты (полости), образующиеся в процессе заполнения формы, в случае малых внутренних деталей формы, когда в форме могут появиться области с давлением, препятствующим ее заполнению. При помощи аналогового моделирования можно найти технологические параметры процесса литья и конструктивные параметры литниковой системы, обеспечивающие качественное заполнение литейной формы.

Для определения масштабов процесса моделирования и параметров модельной формы используется идентичность трех критериев подобия: Рейнольдса (Re), Вебера (We) и Фруда (Fr) [11].

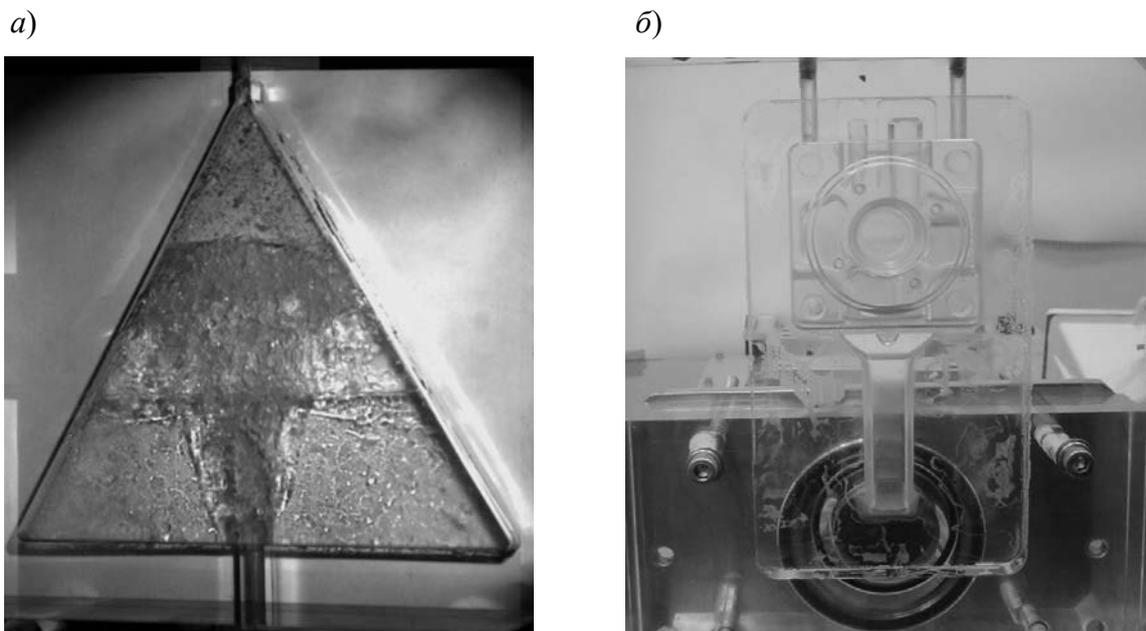


Рис. 3. Прозрачная акриловая модель литейной формы: а – треугольной формы; б – сложной формы

Критерий Рейнольдса обеспечивает подобие сил вязкости и инерции:

$$Re = \frac{wl}{\nu}, \quad (1)$$

где w – скорость движения жидкости; l – характерный размер; ν – кинематический коэффициент вязкости.

Критерий Вебера обеспечивает подобие сил тяжести и поверхностного натяжения[^]

$$We = \frac{\rho l^2}{\sigma}, \quad (2)$$

где ρ – плотность жидкости; σ – коэффициент поверхностного натяжения.

Критерий Фруда обеспечивает подобие сил тяжести и инерции:

$$Fr = \frac{\omega^2}{gl}. \quad (3)$$

С помощью критериев подобия определяются геометрические параметры модельной установки и параметры процесса заполнения формы.

Для моделирования использовали смесь воды и глицерина. Глицерин, обладающий высокой вязкостью, в смеси с водой позволяет получать широкий диапазон вязкостей [12]. Динамическая вязкость смеси чистого глицерина и дистиллированной воды варьируется от 0,01 до 14,1 Па·с при 20 °С (рис. 4).

Программное обеспечение для водного аналогового моделирования литейных процессов

Для получения трехмерной картины заполнения формы разработано программное обеспечение, осуществляющее регистрацию изображений, оцифровку литейной формы и калибровку камер.

Чертежи литейных форм выполнены в векторном формате AutoCAD, что не позволяет осуществлять визуализацию результатов моделирования. Для этой цели разработано программное обеспечение, осуществляющее конвертирование векторного формата файла Autocad в растровый формат (числовой 3D-массив), позволяющий определить

объемные границы заполнения формы жидкостью (рис. 5).

Для получения 3D-картины заполнения формы жидкостью с использова-

нием зарегистрированных двухмерных изображений проводилась пространственная калибровка видеокамер [13].



Рис. 4. Изменение динамической вязкости водного раствора глицерина в зависимости от концентрации

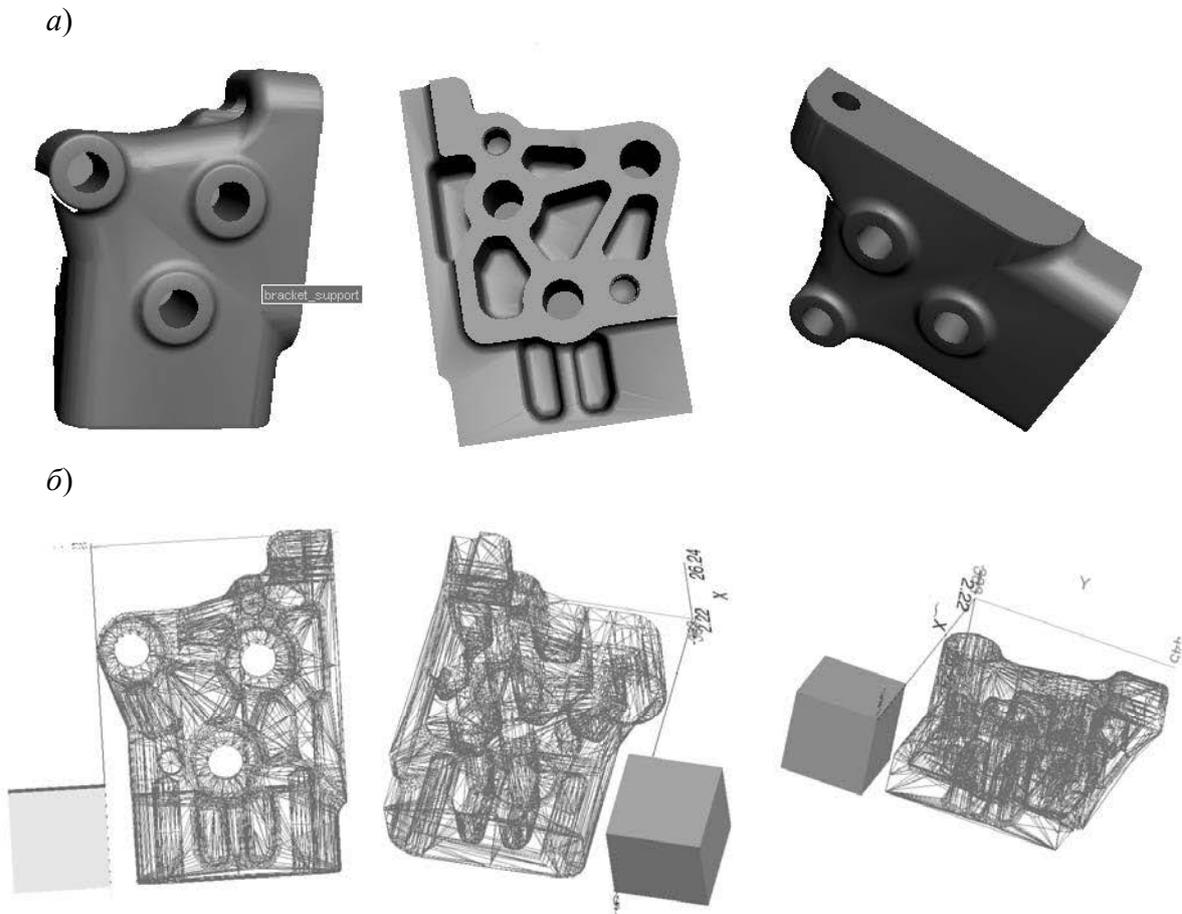


Рис. 5. Конвертирование файла чертежа (а) в числовой массив модельной формы (б)

Данная процедура позволяет связать трехмерные координаты модельной формы с координатами каждой видеокамеры, учитывая параметры видеокамер. В результате калибровки двумерные изображения, полученные с каждой из видеокамер, использовались для формирования трехмерной картины заполнения.

Визуализация данных осуществлялась при помощи программного обеспечения для обработки и визуализации данных (IDL, Matlab). 3D-картину заполнения формы получали как результат расчета положения соответствующих пикселей каждого из четырех изображений, что позволяет получать картину заполнения и поверхность потока жидкости в каждом из сечений формы.

Экспериментальные исследования процесса заполнения литейных форм

С помощью разработанных установок и программного обеспечения для водного аналогового моделирования исследовали процесс заполнения для случая простых (треугольной и прямоугольной) и сложных форм. В качестве модельной жидкости использовали окрашенную воду.

Моделирование процесса заполнения треугольной формы выполняли посредством трех видеокамер. На рис. 6 представлены три исходных изображения, разделенных на полукадры, и трехмерное изображение, полученное с их использованием. Пример заполнения прямоугольной формы шириной 60 мм и высотой 100 мм представлен на рис. 7.

Исследовали процесс заполнения сложной литейной формы на примере промышленных деталей типа «крышка стержня» и «тормозной суппорт». Пример водного аналогового моделирования таких деталей при времени заполнения около 0,5 с приведен на рис. 8. Проведено сравнение численного моделирования с использованием программы AD-STEFAN и водного аналогового моделирования процесса заполнения литейной формы при литье под давлением (рис. 9). При численном моделировании в программу закладывались параметры, соответствующие воде. Эксперименты по водному аналоговому моделированию процесса заполнения формы показали удовлетворительное совпадение с результатами численного моделирования в программном обеспечении AD-STEFAN.

а)

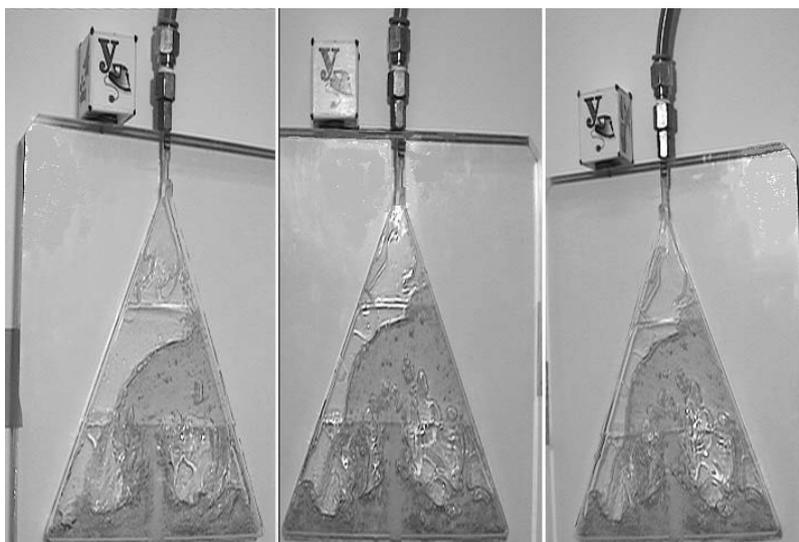
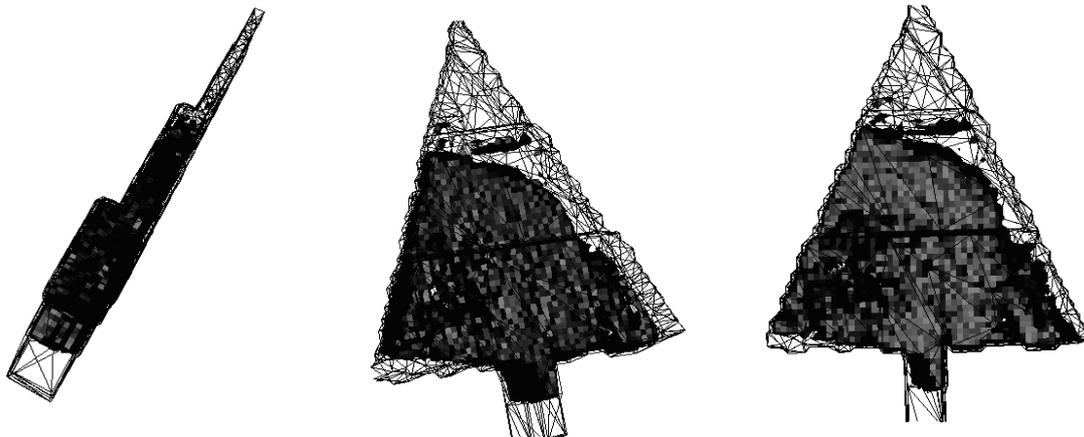


Рис. 6. Процесс заполнения треугольной формы (скорость заполнения – 2000 мм/мин): а – исходные двумерные изображения; б – трехмерные восстановленные

б)



Окончание рис. 6

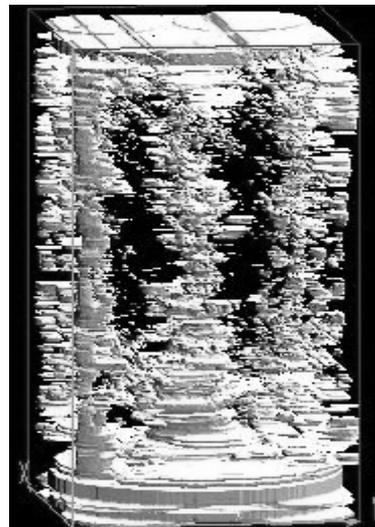
а)



б)



в)



з)



д)



Рис. 7. Процесс заполнения прямоугольной формы (время заполнения – 0,116 с): а, б – исходные изображения; в – трехмерное изображение; з, д – сечения XY и X

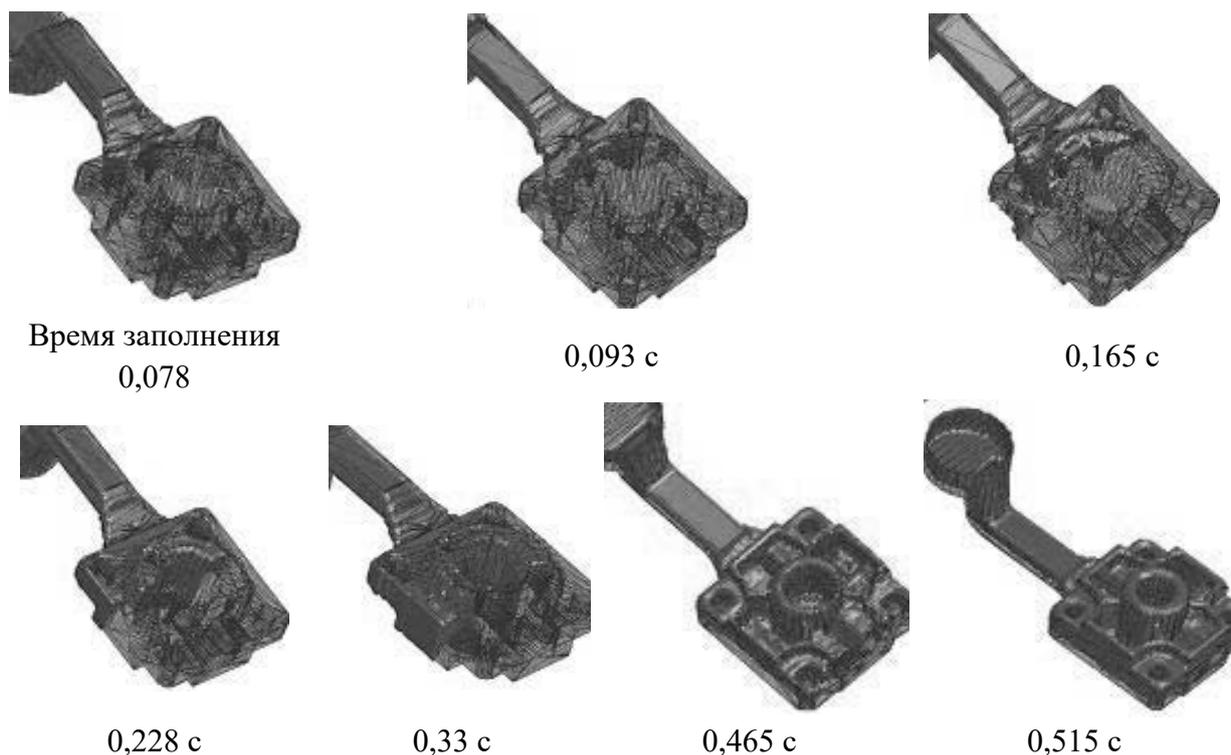


Рис. 8. Водное аналоговое моделирование процесса заполнения сложной литейной формы

Выводы

Разработана установка для водного аналогового моделирования процесса заполнения литейной формы. Основными компонентами установки являются: система создания давления жидкости с микропроцессорным блоком управления; прозрачная акриловая форма для моделирования; система освещения; несколько синхронизированных видеокамер, которые подключаются к компьютеру. Установка позволяет моделировать заполнение литейной формы в процессе литья под давлением и может быть использована при разработке технологических процессов литья под давлением и верификации математических моделей течения металлического расплава при заполнении литейной формы.

Разработано программное обеспечение для водного аналогового моделирования заполнения литейной формы при

литье под давлением, которое позволяет воспроизводить 3D-картину заполнения.

Проведено сравнение водных аналоговых экспериментов по заполнению литейной формы с результатами численного моделирования, произведенного в программе для численного моделирования AD-STEFAN, показавшее удовлетворительное совпадение результатов численного моделирования с результатами экспериментальных исследований.

Таким образом, водное аналоговое моделирование может эффективно использоваться для верификации численных моделей заполнения литейной формы, а также при проектировании оснастки и технологических режимов для процессов литья под давлением, что способствует существенной экономии материальных средств и временных затрат вследствие сокращения количества дорогостоящих натуральных экспериментов.

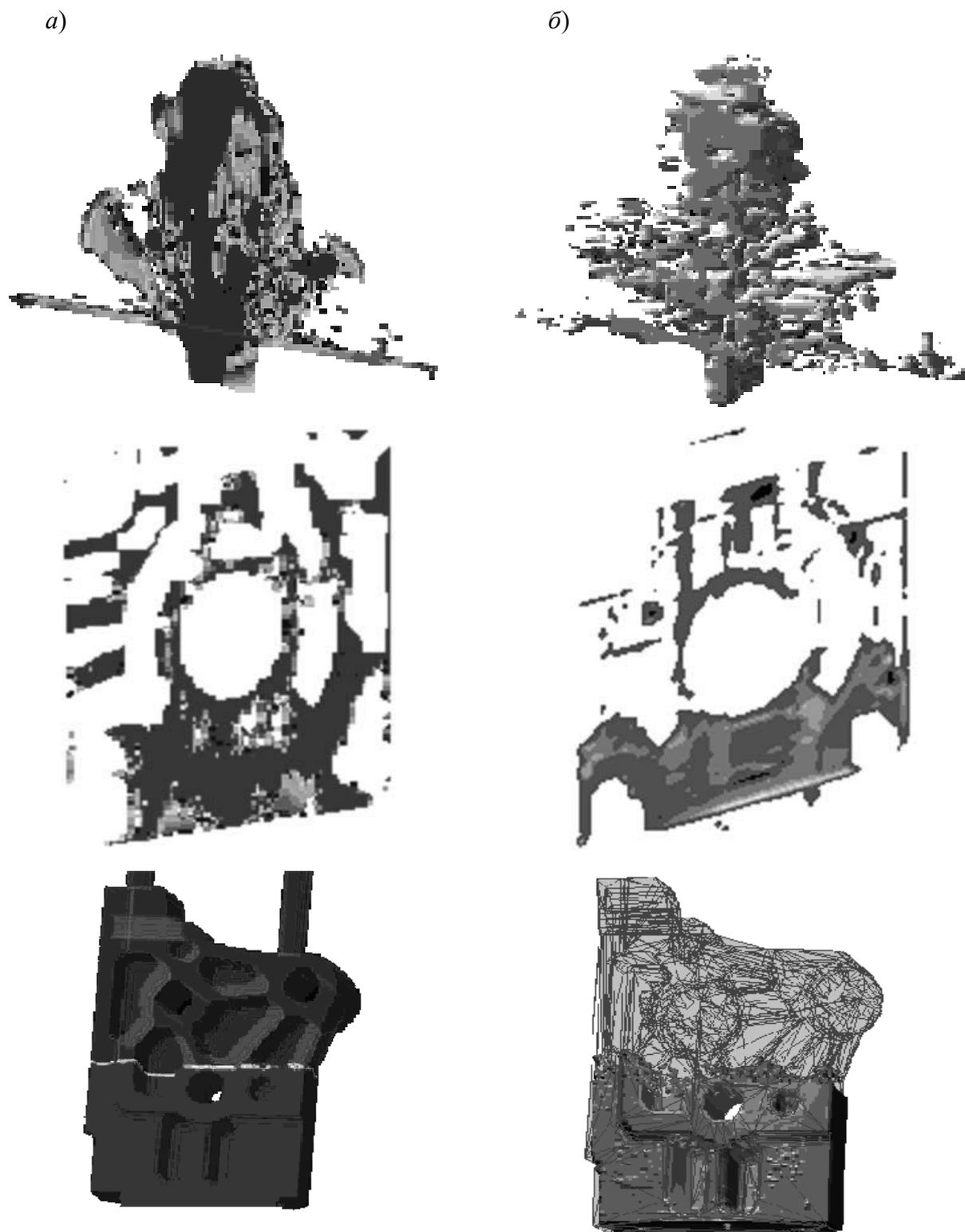


Рис. 9. Сравнение результатов экспериментов по водному аналоговому моделированию с результатами численного моделирования (программа AD-STEFAN): *a* – численное моделирование; *б* – водное аналоговое моделирование

Водное аналоговое моделирование заполнения литейной формы расплавом металла является достаточно точным,

когда изменение температуры расплава металла в литниковой в процессе литья вызывает малое изменение его вязкости.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Flow analysis and validation of numerical modelling for a thin walled high pressure die casting using SPH / P. W. Cleary [et al.] // *Comp. Part. Mech.* – 2014. – P. 229–243.
2. Numerical simulation and experimental validation of free surface flows during low pressure casting process / A. Viswanatha [et al.] // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2017. – № 244. – P. 320–330.
3. Novel Approach to Visualize Liquid Aluminum Flow to Advance Casting Science / C. Bate [et al.] // *Materials.* – 2023. – № 16. – 756.
4. Three-dimensional image reconstruction for water modelling of metal casting processes / J.-K. Choi [et al.] // *International Conference On Modelling and Simulation MS'2004, Minsk, 27–29 April 2004.* – Minsk, 2004. – P. 216–219.
5. Three-dimensional modelling and simulation of die-casting processes for AlSi alloys / H.-Y. Hwang [et al.] // *Proceedings of 67th World Foundry Congress 5–7 June 2006, Harrogate International Centre, United Kingdom.* – Harrogate, 2006. – P. 203/1–203/9. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
6. Гидромоделирование процессов литья / Е. И. Марукович [и др.] // *Литье и металлургия.* – 2010. – № 3. – С. 36–42.
7. Гидромоделирование процессов литья / Е. И. Марукович [и др.] // *Литейное производство.* – 2011. – № 2. – С. 10–14.
8. Экспериментальная верификация результатов моделирования течения расплавов, полученных с помощью компьютерной системы «Пролит-1» / В. Ф. Соболев [и др.] // *Литье и металлургия.* – 2003. – № 3. – С. 5–8.
9. **Duff, E. S.** Fluid Flow Aspects of Solidification Modelling: Simulation of low pressure die casting: PhD thesis, Department of Mining and Metallurgical Engineering / E. S. Duff. – The University of Queensland. – 1999. – P. 217.
10. **Jong, S. H.** Three dimensional mold filling simulation for casting and its experimental verification / S. H. Jong, W. S. Hwang // *AFS Transactions.* – 1991. – Vol. 99. – P. 117–124.
11. **Демченко, Е. Б.** Исследование гидродинамики расплава в кристаллизаторе при вертикальном непрерывном литье / Е. Б. Демченко, Е. И. Марукович // *Литье и металлургия.* – 2006. – № 4. – С. 77–81.
12. **Schmid, M.** Fluid Flow in Die Cavities Experimental and Numerical Simulation / M. Schmid, F. Klein // *Transactions, 18th NADCA International Die Casting Congress and Exposition.* – Indianapolis, 1995. – P. 93–99.
13. The technique of calibration multi camera imaging system for fast water flow registration and reconstruction / J.-K. Choi [et al.] // *Proceedings of the Eight International Conference Pattern recognition and information processing, Minsk, 18–20 May 2005.* – Minsk, 2005. – P. 177–180.

Статья сдана в редакцию 28 июня 2023 года

Контакты:

inmet@mail.ru (Брановицкий Александр Михайлович).

A. M. BRANOVITSKY

WATER ANALOGUE MODELING OF PROCESSES OF FILLING A CASTING MOLD WITH METAL MELT DURING DIE CASTING

Abstract

The paper presents results of water analogue modeling of the process of filling a casting mold with metal melt during die casting. A plant and software for modeling casting processes have been developed, which reproduce a three-dimensional pattern of mold filling and can be used to verify numerical models of mold filling, as well as make it possible to develop and optimize casting processes and the gating system design.

Keywords:

water analogue modeling, die casting, casting mold, metal melt.

For citation:

Branovitsky, A. M. Water analogue modeling of processes of filling a casting mold with metal melt during die casting / A. M. Branovitsky // *Belarusian-Russian University Bulletin.* – 2023. – № 3 (80). – P. 6–15.

DOI: 10.53078/20778481_2023_3_16

УДК 621:787

А. М. ДОВГАЛЕВ, канд. техн. наук, доц.

Д. М. СВИРЕПА, канд. техн. наук, доц.

М. В. ТАРАДЕЙКО

И. А. ТАРАДЕЙКО

Н. Ю. МАЛИНОВСКИЙ

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МОДИФИЦИРОВАНИЯ НАРУЖНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ИМПУЛЬСНО-УДАРНЫМ НАКАТЫВАНИЕМ И ВРАЩАЮЩИМСЯ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Аннотация

Предложена математическая модель процесса модифицирования наружных цилиндрических поверхностей деталей импульсно-ударным накатыванием и вращающимся магнитным полем. Получены аналитические зависимости, описывающие кинематические характеристики деформирующего шара в момент его движения от намагниченной детали до шара-отражателя.

Ключевые слова:

совмещенная обработка, поверхностное пластическое деформирование, магнитное поле, импульсно-ударное накатывание, математическое моделирование, модифицирование наружных цилиндрических поверхностей.

Для цитирования:

Математическое моделирование процесса модифицирования наружных цилиндрических поверхностей деталей импульсно-ударным накатыванием и вращающимся магнитным полем / А. М. Довгалев, Д. М. Свирепа, М. В. Тарадейко, И. А. Тарадейко, Н. Ю. Малиновский // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 3 (80). – С. 16–25.

Введение

Получение модифицированного поверхностного слоя деталей машин является актуальной задачей для машиностроения. Известны методы магнитно-динамического раскатывания, а также магнитно-динамического и совмещенного накатывания поверхностей нежестких деталей. Выполнено математическое моделирование процессов упрочнения, осуществляемое указанными методами [1–4]. Однако данные методы не позволяют произвести обработку наружных цилиндрических поверхностей деталей инструментами обхватывающего типа, обладающими высокими показателями производительности. В связи с этим процесс модифици-

рования наружных цилиндрических поверхностей деталей импульсно-ударным накатыванием и вращающимся магнитным полем вызывает повышенный научно-практический интерес. В его основе лежит импульсно-ударное воздействие деформирующих шаров на обрабатываемую деталь. Обработка поверхностей указанным способом позволяет интенсифицировать процесс упрочнения, а также обрабатывать детали машин из немагнитопроводных материалов.

Объект исследования

Для импульсно-ударного накатывания поверхности валов во вращающемся магнитном поле разработано устройство, представленное на рис. 1 [5, 6].

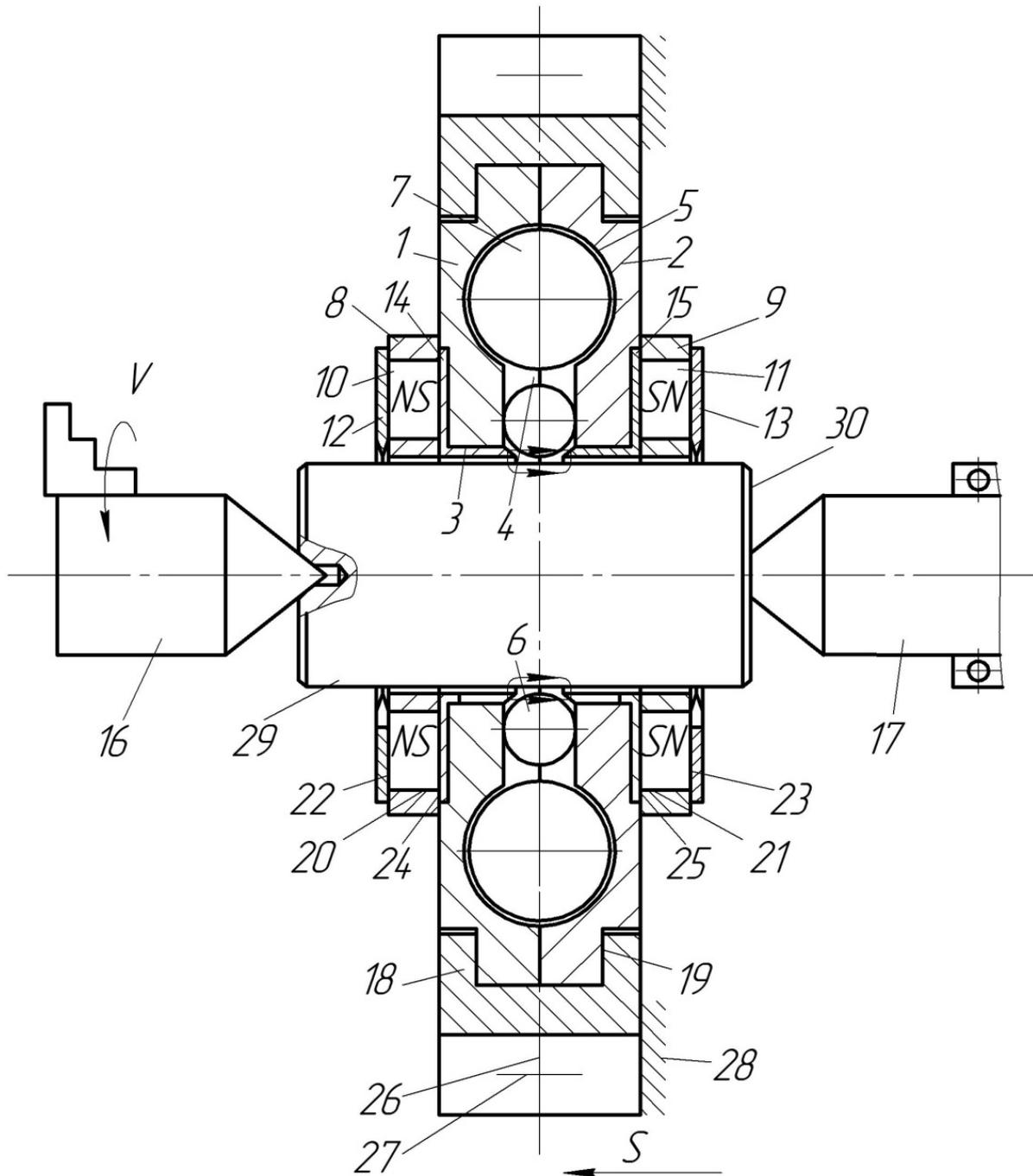


Рис. 1. Конструкция устройства для импульсно-ударного накатывания поверхности вала

Устройство содержит следующие основные элементы: диски 1, 2 с центральным отверстием 3; сообщающиеся внутреннюю 4 и внешнюю 5 кольцевые камеры; деформирующие шары 6; шары-отражатели 7; магнитную систему, состоящую из обойм 8, 9, цилиндрических постоянных магнитов 10, 11, магнитопроводов 12, 13 для намагничива-

ния поверхности вала, зубчатых магнитопроводов 14, 15 для привода деформирующих шаров; центры 16, 17; корпус 18 с центральной выточкой 19.

Внутренняя кольцевая камера 4 выходит в полость отверстия 3 дисков 1, 2. Деформирующие шары 6 установлены во внутренней кольцевой ка-

мере 4, а шары-отражатели – во внешней кольцевой камере 5.

Цилиндрические постоянные магниты 10, 11 установлены в радиальных отверстиях 20, 21 обойм 8, 9 с одинаковым расположением полюсов и взаимодействуют с торцами 22, 23 магнитопроводов 12, 13 и 24, 25 зубчатых магнитопроводов 14, 15. Обоймы 8, 9 закреплены на дисках 1, 2 соосно центральному отверстию 3, симметрично плоскости вращения 26 деформирующих шаров 6. Диски 1, 2 установлены в центральной выточке 19 корпуса 18. Центры 16, 17 расположены соосно друг другу и продольной оси центрального отверстия 3 дисков 1, 2.

Диски 1, 2, обоймы 8, 9, центры 16, 17, корпус 18 выполнены из немагнитопроводных материалов.

Устройство работает следующим образом. Центр 16 закрепляют в патроне станка с возможностью передачи крутящего момента, а центр 17 – в подшипниковой опоре, расположенной в пиноли станка. Корпус 18 крепят винтами 27 на суппорте 28 станка. Радиальным перемещением резцедержателя совмещают продольную ось центров 16, 17 с продольной осью отверстия 3 дисков 1, 2. Обрабатываемый вал 29 вводят в отверстие 3 дисков 1, 2 и закрепляют в центрах 16, 17. Ось симметрии кольцевых камер 4, 5, совпадающую с плоскостью вращения 26 деформирующих шаров 6, совмещают с правым (относительно чертежа) торцом вала 30. Линии магнитного поля замыкаются через магнитопроводы 12, 13 и поверхность ферромагнитного вала 29 или, при обработке немагнитных материалов, через деформирующие шары 6.

Валу 29 сообщают вращение, а корпусу 18 устройства – движение подачи. Намагниченный вращаемый участок вала 29, а также магнитопроводы 14, 15 воздействуют на деформирующие шары 6 и разгоняют их в окружном направлении кольцевой камеры 4. Под действием возникающей центро-

бежной силы деформирующие шары расходятся в радиальном направлении до шаров-отражателей 7. Периодически сталкиваясь с шарами-отражателями 7, деформирующие шары 6 меняют траекторию своего движения в направлении к упрочняемой поверхности вала 29, достигают ее и, соударяясь с поверхностью вала, осуществляют динамическое упрочнение. Причем поверхностное пластическое деформирование поверхности осуществляется в металле, находящемся в напряженном состоянии под действием магнитного поля. Фактически имеет место совмещенное упрочнение – импульсно-ударным деформированием и магнитным полем, что повышает производительность упрочняющей обработки и глубину упрочненного слоя. На поверхности вала формируется новый рельеф с низкой шероховатостью и профилем, представляющим собой пересечение лунок от деформирующих шаров, внедряемых в поверхность при динамическом ударе.

Математическое моделирование процесса импульсно-ударного накатывания наружных цилиндрических поверхностей во вращающемся магнитном поле

Процесс импульсно-ударного накатывания наружных поверхностей вращения реализуется механической системой, состоящей из устройства намагничивания поверхностного слоя ферромагнитной детали, вращающейся ферромагнитной детали, деформирующих шаров и шаров-отражателей, установленных в кольцевых камерах инструмента с возможностью взаимодействия (см. рис. 1 и 2).

Для выполнения математического моделирования данной механической системы введем следующие допущения [7]:

- продольная ось инструмента располагается горизонтально;
- рассматриваем движение одного деформирующего шара, т. к. все дефор-

мирующие шары инструмента находятся в одинаковых условиях;

– исследуем относительное движение деформирующего шара в плоскости, перпендикулярной продольной оси инструмента в подвижной системе координат;

– деформирующий шар и шар-отражатель рассматриваем как материальные точки с массами, помещенными в центр сфер соответствующих радиусов;

– магнитное взаимодействие между деформирующими шарами инструмента отсутствует;

– сила магнитного притяжения деформирующего шара к намагниченной детали и зубьям магнитопровода направлена по линии, соединяющей их геометрические центры;

– источники магнитного поля инструмента расположены с равномерным угловым шагом;

– на поверхности ферромагнитного вала магнитная система инструмента создает однородное магнитное поле.

Моделирование движения деформирующего шара от намагниченной детали до шара-отражателя

Рассмотрим движение деформирующего шара относительно подвижных осей координат x_1Oy_1 , связанных с центром масс деформирующего шара (система координат xOy совмещена с центром масс детали) (см. рис. 2, а).

Запишем основное уравнение динамики относительного движения деформирующего шара:

$$m_1 \vec{a}_r = \vec{G} + \vec{N} + \vec{T} + \vec{\Phi}_{en} + \vec{\Phi}_{et} + \vec{F}_{mp} + \vec{F}_{MD} + \vec{F}_{M3}, \quad (1)$$

где m_1 – масса деформирующего шара; \vec{a}_r – относительное ускорение центра масс деформирующего шара; \vec{G} – сила тяжести деформирующего шара;

\vec{N}, \vec{T} – нормальная и касательная составляющие силы взаимодействия деформирующего шара с поверхностью намагниченной детали (в момент отрыва деформирующего шара от поверхности детали указанные силы равны нулю); $\vec{\Phi}_{en}$ – нормальная составляющая переносной силы инерции (при отрыве от намагниченной поверхности детали $\vec{\Phi}_{en} = 0$); $\vec{\Phi}_{et}$ – касательная составляющая переносной силы инерции (при установившемся режиме угловая скорость вращения намагниченного вала – величина постоянная, следовательно, $\vec{\Phi}_{et} = 0$); $\vec{F}_{MD}, \vec{F}_{M3}$ – составляющие силы магнитного притяжения деформирующего шара к намагниченной поверхности детали и зубьям магнитопровода соответственно; \vec{F}_{mp} – сила трения скольжения деформирующего шара о поверхность дисков. Так как деформирующие шары установлены с боковыми осевыми зазорами во внутренней кольцевой камере инструмента, то трение скольжения пренебрежительно мало либо вовсе отсутствует ($\vec{F}_{mp} = 0$).

До отрыва деформирующего шара от поверхности намагниченной детали силы \vec{G}, \vec{T} и \vec{N} уравнивают друг друга.

После отрыва деформирующего шара от поверхности детали силой \vec{G} пренебрегаем, т. к. она значительно меньше остальных, действующих на него сил.

Рассмотрим силы Φ_{en} и Φ_{et} , входящие в уравнение (1):

$$\Phi_{en} = m_1 \omega^2 r_n; \quad (2)$$

$$\Phi_{et} = m_1 \varepsilon r_n, \quad (3)$$

где ω – угловая скорость вращения намагниченной детали; r_n – начальное расстояние между геометрическими центрами детали и деформирующего шара: $r_n = r_1 + r_2$, где r_1, r_2 – радиусы

деформирующего шара и упрочняемой детали соответственно.

Сила магнитного притяжения определяется как геометрическая сумма

составляющих магнитных сил, действующих со сторон ферромагнитного вала и зубьев магнитопровода.

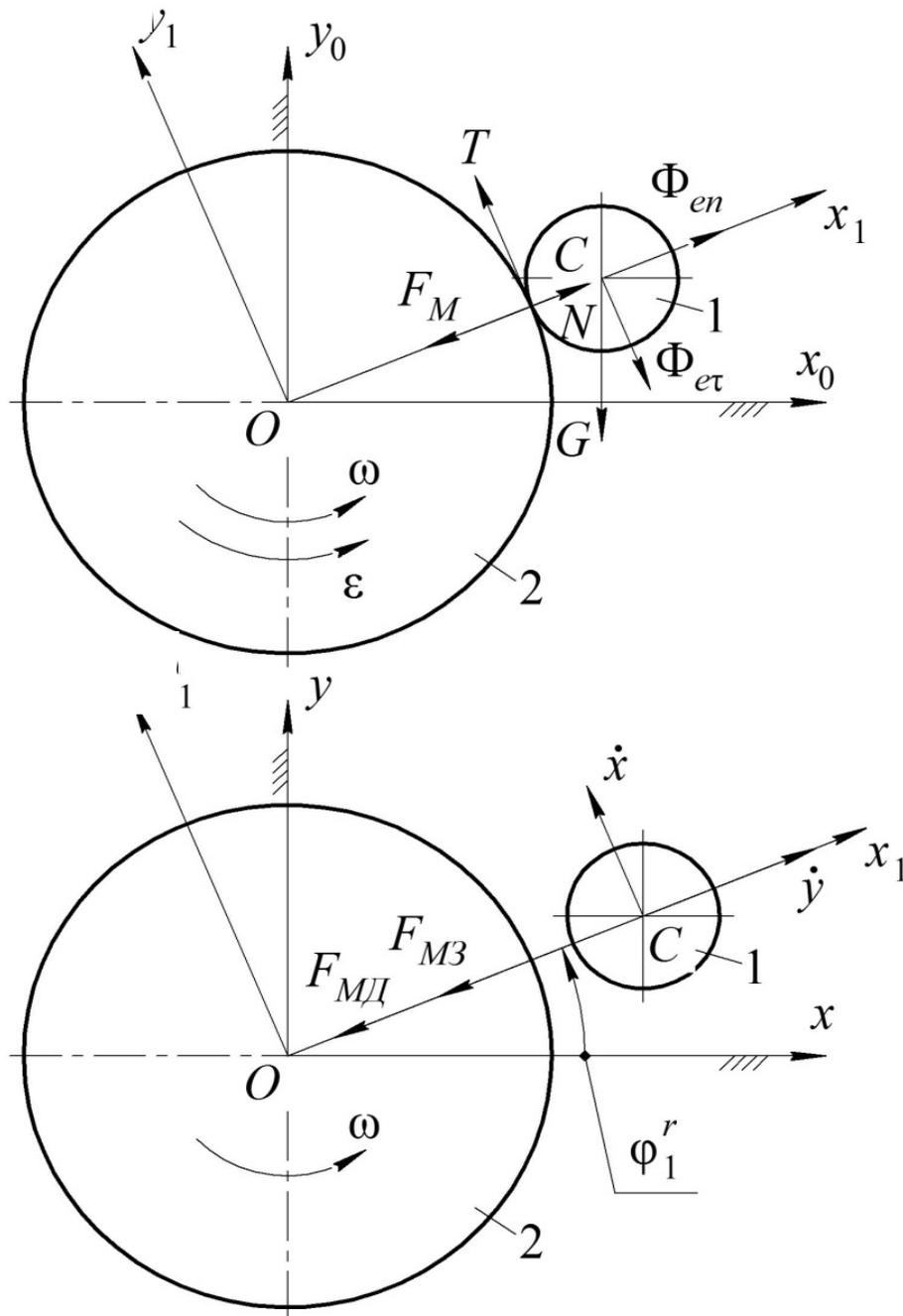


Рис. 2. Схема движения деформирующего шара: *a* – в момент отрыва от намагниченной детали; *b* – после отрыва от детали и перемещения к шару-отражателю; 1 – деформирующий шар инструмента; 2 – поперечное сечение намагниченного вращающегося вала

Магнитная сила, действующая на деформирующий шар со стороны детали, определяется по известной зависимости [8]. С высокой достоверностью указанная функция силы аппроксимируется следующим простым выражением:

$$F_{MD} = A_1(r - r_1)^{-b_1}, \quad (4)$$

где A_1 , b_1 – эмпирические коэффициенты, зависящие от свойств магнитного поля, а также материала упрочняемой детали и деформирующего шара; r – расстояние между геометрическими центрами деформирующего шара и ферромагнитной детали.

Ввиду вышеуказанного запишем силу магнитного притяжения деформирующего шара к зубьям магнитопровода:

$$F_{M3} = A_2 r_3^{-b_2}, \quad (5)$$

где A_2 , b_2 – эмпирические коэффициенты, зависящие от свойств магнитного поля, формы зубьев и материала зубчатого магнитопровода; r_3 – расстояние от центра деформирующего шара до зуба магнитопровода.

Определим расстояние от центра деформирующего шара до зуба магнитопровода. Рассмотрим рис. 3.

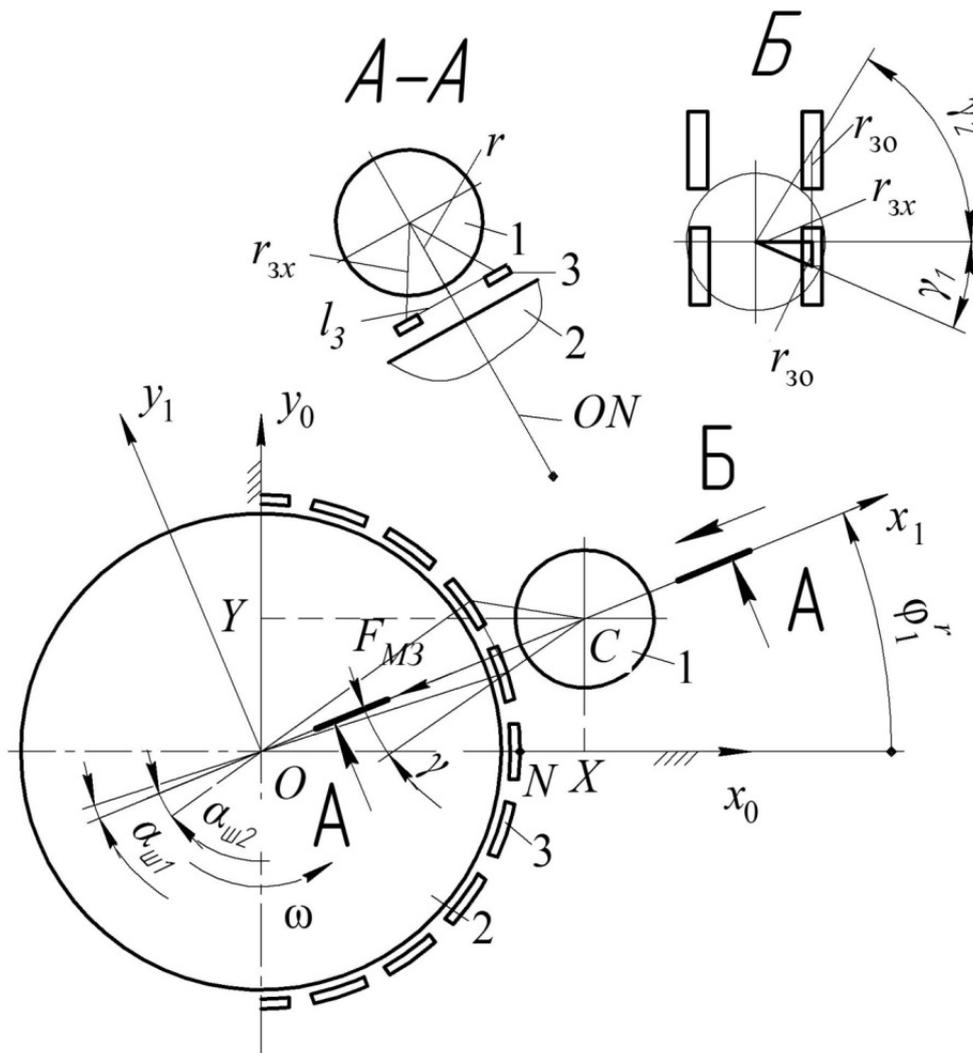


Рис. 3. Схема для расчета силы магнитного притяжения деформирующего шара к зубчатому магниту: 1 – деформирующий шар; 2 – вращающийся вал; 3 – зубья магнитопровода

Расстояние от центра деформирующего шара до зуба магнитопровода r_{zx} в сечении, проходящем через ось Ox_1 перпендикулярно поперечному сечению,

$$r_{zx}^2 = l_3^2 + (r - ON)^2, \quad (6)$$

где l_3 – расстояние от оси симметрии зуба в поперечном сечении до плоскости движения шара; ON – радиальный размер внутренней поверхности зубчатого магнитопровода.

Величина окружного смещения шара определяется как

$$r_{zo} = r_{zx} \cdot \operatorname{tg} \gamma, \quad (7)$$

где γ – угол смещения в окружном направлении деформирующего шара относительно оси симметрии зуба.

Угол смещения в окружном направлении шара найдем по теореме синусов:

$$\frac{ON}{\sin \gamma} = \frac{r}{\sin \alpha_{u1}},$$

откуда, в соответствии с рис. 3,

$$\gamma_1 = \arcsin \left(\frac{ON \sin \alpha_{u1}}{r} \right); \quad (8)$$

$$\gamma_2 = \arcsin \left(\frac{ON \sin \alpha_{u2}}{r} \right), \quad (9)$$

где α_{u1} , α_{u2} – углы между линиями, соединяющими геометрический центр детали с геометрическим центром деформирующего шара и с геометрическим центром соответствующего зуба.

Так как сила магнитного притяже-

ния стремительно убывает при удалении от магнита, то целесообразно рассмотреть взаимодействие шара только со смежными зубьями магнитопровода.

Тогда можно ввести условие

$$\alpha_{u1} = \varphi_r - i \frac{2\pi}{z_3}; \quad (10)$$

$$\alpha_{u2} = \frac{2\pi}{z_3} - \alpha_{u1} = \frac{2\pi}{z_3} (1 + i) - \varphi_r, \quad (11)$$

где i – целая часть числа, определяющая положение шара,

$$i = \left\lfloor \frac{\varphi_r}{2\pi / z} \right\rfloor; \quad (12)$$

φ_r – угол поворота деформирующего шара относительно неподвижной системы координат xOy .

Из рис. 3 следует

$$\varphi_r = \operatorname{arctg} \left(\frac{X}{Y} \right). \quad (13)$$

Радиус-вектор, соединяющий геометрический центр деформирующего шара и геометрический центр магнитопроводного зуба, определяется как

$$\vec{r}_3 = \vec{r}_{zx} + \vec{r}_{zo},$$

а его длина как

$$r_3 = \sqrt{r_{zx}^2 + r_{zo}^2}. \quad (14)$$

Подставляя (6)–(13) в выражение (14), получаем

$$r_{31} = \sqrt{\left(l_3^2 + (r - ON)^2\right) \left(1 + \operatorname{tg}^2 \left(\operatorname{arcsin} \left(\frac{ON \sin \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{X}{Y} \right) - i \cdot \frac{2\pi}{z_3} \right)}{r} \right) \right) \right)}; \quad (15)$$

$$r_{32} = \sqrt{\left(l_3^2 + (r - ON)^2\right) \left(1 + \operatorname{tg}^2 \left(\operatorname{arcsin} \left(\frac{ON \sin \left(\frac{2\pi}{z_3} (1 + i) - \operatorname{arctg} \left(\frac{Y}{X} \right) \right)}{r} \right) \right) \right)}. \quad (16)$$

Найдем проекции сил магнитного притяжения к зубьям магнитопровода

на оси Ox_1 и Oy_1 :

$$F_{M3(1+2)x} = A_2 r_{31}^{-b_2} \cdot \cos \gamma_1 + A_2 r_{32}^{-b_2} \cdot \cos \gamma_2 = A_2 r_{31}^{-b_2} \left(\cos \gamma_1 + \left(\frac{r_{32}}{r_{31}} \right)^{-b_2} \cdot \cos \gamma_2 \right); \quad (17)$$

$$F_{M3(1+2)y} = A_2 r_{31}^{-b_2} \cdot \sin \gamma_1 + A_2 r_{32}^{-b_2} \cdot \sin \gamma_2 = A_2 r_{31}^{-b_2} \left(\sin \gamma_1 + \left(\frac{r_{32}}{r_{31}} \right)^{-b_2} \cdot \sin \gamma_2 \right). \quad (18)$$

Так как $r = x^2 + y^2$, то проекции радиус-вектора на подвижные оси координат xOy , связанные с деталью, можно записать как

$$\sin \varphi_r = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}. \quad (20)$$

$$\cos \varphi_r = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}; \quad (19)$$

После преобразований запишем уравнение (1) в проекциях компонентов на оси координат Oxy в форме Коши:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \left(A_1 (r - r_1)^{-b_1} + A_2 r_{31}^{-b_2} \left(\cos \gamma_1 + \left(\frac{r_{32}}{r_{31}} \right)^{-b_2} \cdot \cos \gamma_2 \right) \right) \cdot \cos \varphi_r; \\ \ddot{y} = \left(A_1 (r - r_1)^{-b_1} + A_2 r_{31}^{-b_2} \left(\sin \gamma_1 + \left(\frac{r_{32}}{r_{31}} \right)^{-b_2} \cdot \sin \gamma_2 \right) \right) \cdot \sin \varphi_r. \end{cases} \quad (21)$$

При решении системы (21) методами численного интегрирования следует соблюдать краевые условия координат

центра масс и скорости деформирующего шара [7]:

– начальные

$$t = t_0; x = r_1 + r_2; y = 0;$$

$$\sqrt{x_k^2 + y_k^2} \leq OC_{\max},$$

$$\dot{x} = 0; \dot{y} = \omega r_n; \sqrt{x_0^2 + y_0^2} = r_1 + r_2;$$

– текущие

$$t = t; x = x; y = y; \dot{x} = \dot{x};$$

$$\dot{y} = \dot{y}; \sqrt{x^2 + y^2} = r;$$

– конечные

$$t = t_k; x = x_k; y = y_k; \dot{x} = \dot{x}_k;$$

$$\dot{y} = \dot{y}_k; \sqrt{x_k^2 + y_k^2} = r_k,$$

где $t_0, t_k, x_0, x_k, y_0, y_k, \dot{x}_0, \dot{x}_k, \dot{y}_0, \dot{y}_k$ – время, координаты центра деформирующего шара и проекции скорости деформирующего шара на оси Ox и Oy в начальный и конечный момент фазы движения деформирующего шара от упрочняемой поверхности детали до взаимодействия с шаром-отражателем соответственно.

При численном интегрировании следует соблюдать условие

где OC_{\max} – максимально возможное расстояние между геометрическими центрами детали и деформирующего шара (определяется конструкцией инструмента и угловым положением деформирующего шара).

Заключение

В результате математического моделирования получена система дифференциальных уравнений, описывающих кинематику движения деформирующего шара от намагниченной детали до шара-отражателя при модифицировании наружных цилиндрических поверхностей деталей импульсно-ударным накатыванием и вращающимся магнитным полем. Найдены начальные, текущие и конечные условия для численного интегрирования дифференциальных уравнений и определения кинематических характеристик деформирующего шара при различных режимах обработки и конструктивных параметрах устройства для импульсно-ударного накатывания.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Довгалев, А. М. Магнитно-динамическое и совмещенное накатывание поверхностей жестких деталей / А. М. Довгалев. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 266 с.
2. Упрочняющий инструмент: пат. ВУ 15364 / А. М. Довгалев, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков, С. А. Сухоцкий. – Оубл. 28.02.2012.
3. Довгалев, А. М. Технология магнитно-динамического раскатывания и ее реализация в машиностроении / А. М. Довгалев, Д. М. Свирепа // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2014. – С. 10–15.
4. Довгалев, А. М. Математическое моделирование процесса магнитно-динамического раскатывания / А. М. Довгалев, И. И. Маковецкий, Д. М. Свирепа // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2010. – № 4 (64). – С. 26–30.
5. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки вала: пат. ВУ 18302 / А. М. Довгалев, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа, И. А. Тарадейко. – Оубл. 30.08.2013.
6. Тарадейко, М. В. Двухрядный инструмент для импульсно-ударного деформирования / М. В. Тарадейко, И. А. Тарадейко // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2021. – С. 62.
7. Математическое моделирование процесса магнитно-динамического упрочнения наружной поверхности вращения / А. М. Довгалев [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2013. – № 4. – С. 25–34.
8. Моделирование процесса совмещенной упрочняющей обработки импульсно-ударным раскатыванием и вращающимся магнитным полем / В. К. Шелег [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2014. – № 1. – С. 73–84.

Статья сдана в редакцию 7 июля 2023 года

Контакты:

www.rct.bru.by (Довгалева Александр Михайлович);
svdima@tut.by (Свирина Дмитрий Михайлович);
IvanTaradeiko@yandex.ru (Тарадейко Марина Вадимовна);
IvanTaradeiko@yandex.ru (Тарадейко Иван Анатольевич);
nik.klass.97@mail.ru (Малиновский Никита Юрьевич).

**A. M. DOVGALEV, D. M. SVIREPA, M. V. TARADEIKO, I. A. TARADEIKO,
N. Y. MALINOVSKY**

**MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF MODIFYING
EXTERNAL CYLINDRICAL SURFACES OF PARTS BY USING
IMPULSE-IMPACT ROLLING AND A ROTATING MAGNETIC FIELD**

Abstract

A mathematical model for the process of modifying external cylindrical surfaces of parts by using impulse-impact rolling and a rotating magnetic field is proposed. Analytical dependencies have been obtained which describe kinematic characteristics of the deforming ball at the moment of its movement from a magnetized part to the reflecting ball.

Keywords:

combined processing, surface plastic deformation, magnetic field, impulse-impact rolling, mathematical modeling, modification of external cylindrical surfaces.

For citation:

Mathematical modeling of the process of modifying external cylindrical surfaces of parts by using impulse-impact rolling and a rotating magnetic field / A. M. Dovgalev, D. M. Svirepa, M. V. Taradeiko, I. A. Taradeiko, N. Y. Malinovsky // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 3 (80). – P. 16–25.

DOI: 10.53078/20778481_2023_3_26

УДК 539.4: 666.3

И. М. КУЗМЕНКО, канд. техн. наук, доц.**В. А. ПОПКОВСКИЙ**, канд. техн. наук, доц.**А. Д. КРИЖЕВСКИЙ**

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

СОПРОТИВЛЕНИЕ РАЗРУШЕНИЮ КОНСОЛЬНОЙ БАЛКИ С КРАЕВОЙ ТРЕЩИНОЙ НА ПОВЕРХНОСТИ**Аннотация**

Представлен анализ сопротивления разрушению консольной балки с трещиной, расположенной вблизи заделки. На основе методов механики разрушения определены критические параметры, характеризующие особенности разрушения балки при различных температурах.

Ключевые слова:

трещина, критические напряжения, коэффициент интенсивности напряжений, эффективная длина трещины, конечно-элементная модель.

Для цитирования:

Кузменко, И. М. Сопротивление разрушению консольной балки с краевой трещиной на поверхности / И. М. Кузменко, В. А. Попковский, А. Д. Крижевский // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 3 (80). – С. 26–34.

Введение

Основным конструктивным несущим элементом большинства строительных конструкций являются балки с различным поперечным сечением. Одним из часто встречающихся дефектов являются трещины на поверхности различного происхождения.

Механические свойства материала балки и условия ее эксплуатации в значительной степени сказываются на характере разрушения и значениях коэффициента интенсивности напряжений (КИН) и эффективной длины распространяющейся трещины.

Рассмотрена консольная балка прямоугольного поперечного сечения высотой B и основанием t , которая нагружена на конце консоли силой F (рис. 1). Длина балки L . Материал балки – низколегированная сталь 15ХСНД.

В результате обследования на расстоянии a от заделки обнаружена краевая трещина длиной l .

Балка работает на поперечный из-

гиб. Длина балки L значительно больше ширины сечения t , поэтому действием поперечных сил и, соответственно, касательных напряжений пренебрегаем. Используем известные из классического курса «Сопротивление материалов» расчетные зависимости. Из условия прочности по нормальным напряжениям при изгибе для прямоугольного сечения

$$\sigma_{\max} = \frac{6 \cdot F \cdot L}{t \cdot B^2}. \quad (1)$$

Балка выполнена из пластичного материала – низколегированной стали 15ХСНД [5, табл. 2.1, с. 103], имеющей механические характеристики (табл. 1).

Расчет коэффициента интенсивности напряжений (КИН) ведется на основе известной формулы Гриффитса [1–6] с учетом поправочной функции f_k :

$$K = \sigma \sqrt{\pi l} \cdot f_k, \quad (2)$$

где l – длина краевой трещины; σ – величина приложенного в сечении нор-

мального напряжения.

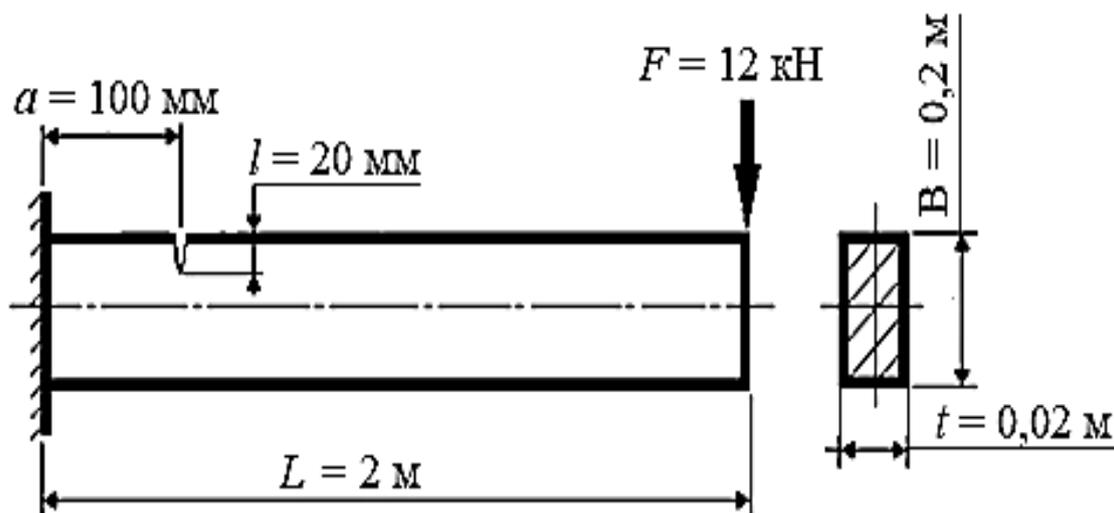


Рис. 1. Консольная балка прямоугольного сечения с краевой трещиной вблизи заделки

Табл. 1. Механические характеристики низколегированной стали 15ХСНД

Температура испытания, К	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности σ_B , МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость, 10^2 кДж/м ²	Критический КИН K_{IC} , МПа $\sqrt{м}$
293	320	510	33	68	9...15	45
253	340	550	34	65	6...11	59
233	350	570	35	64,6	3...5	66

Если длина трещины мала по сравнению с высотой сечения балки, то такая трещина является трещиной нормального отрыва [1]: $l = 0,02 \text{ м} \ll B = 0,2 \text{ м}$.

Значения поправочной функции определяются или непосредственно по таблицам в зависимости от относительной глубины трещины $\lambda = l / B$, или расчетом по приближенной формуле:

$$f_K = c_0 + c_1 l + c_2 l^2 + c_3 l^3 + \dots + c_n l^n, \quad (3)$$

где c_0, c_1, \dots, c_n – коэффициенты [1].

Образование зоны пластических

деформаций вблизи трещины (при квазихрупком разрушении) приводит к увеличению ее длины по сравнению со случаем упругих деформаций. При определении эффективной длины трещины учитывается протяженность зоны пластического деформирования вблизи вершины этой трещины.

Расчет КИН и критической длины трещины с учетом длины зоны пластической деформации трещины $l_{пл.д.}$ (по Ирвину и Оровану) или, что то же, по эффективной длине $l_{эфф.}$ (рис. 2):

$$l_{эфф.} = l \left(1 + 0,5 \left(\frac{\sigma_{тр.}}{\sigma_{0,2}} \right)^2 \right). \quad (4)$$

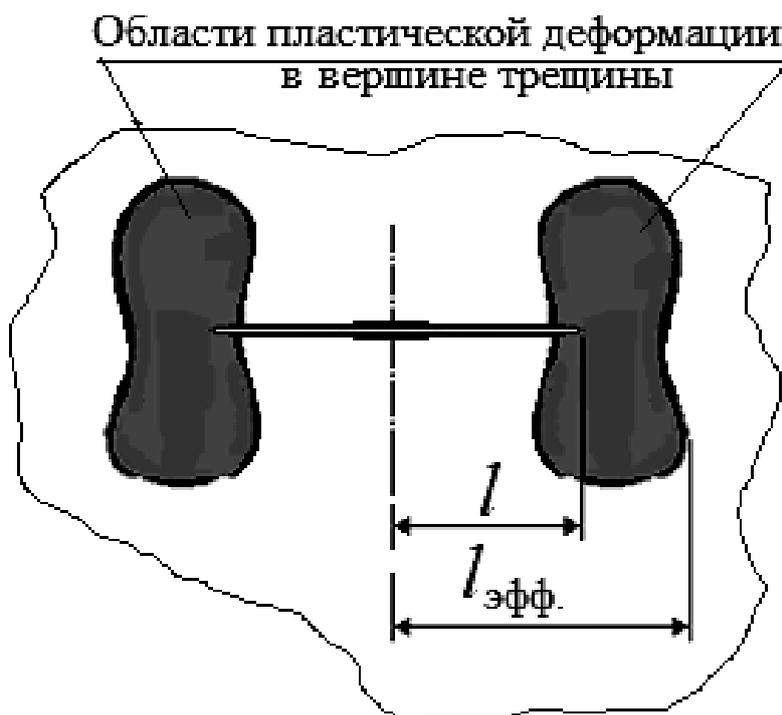


Рис. 2. К определению эффективной длины трещины

Основная часть

Выполним проверку прочности балки при отсутствии трещины и определим, насколько опасна выявленная трещина в различных температурных условиях.

1. Проведем проверку прочности балки при отсутствии трещины для заданных исходных данных, при температуре эксплуатации $T = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и величине допускаемого напряжения стали $[\sigma] = 250\text{ МПа}$.

2. Определим, насколько опасна выявленная трещина.

2.1. При нормальной температуре эксплуатации балки ($T = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

2.2. При понижении температуры до $T = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3. Проведем расчет балки на основе метода конечных элементов.

Порядок выполнения.

1. Проверка прочности балки при отсутствии трещины.

Проверка прочности осуществля-

ется для опасного сечения балки, в котором изгибающий момент будет максимальным (в заделке, где $M_{\max} = FL$). Максимальные нормальные напряжения σ_{\max} действуют в слоях, наиболее удаленных от нейтрального слоя (оси X). В соответствии с (1)

$$\sigma_{\max} = \frac{6 \cdot 12 \cdot 10^3 \cdot 2}{0,02 \cdot 0,2^2} = 180\text{ МПа}.$$

Прочность балки обеспечена: $180\text{ МПа} < 250\text{ МПа}$.

2. Определяем уровень опасности выявленной трещины.

Проверяем выполнение требований к геометрическим размерам: $L = 2\text{ м} \gg B = 0,2\text{ м}$; $B = 0,2\text{ м} > 5t = 0,1\text{ м}$; $L = 2\text{ м} > 10t = 0,2\text{ м}$. Требования соблюдаются.

Таким образом, данная балка может рассматриваться как полоса ограниченных по высоте размеров с краевой трещиной, нагруженная нормальными напряжениями от изгиба.

2.1. Выясняем, насколько опасна трещина при нормальной температуре эксплуатации балки ($T = +20$ °С). Определяем величину коэффициента интенсивности напряжений (КИН) и критическую длину трещины.

По условию данной задачи

$$\lambda = \frac{l}{B} = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{0,2} = 0,1.$$

Для полосы ограниченных размеров с краевой трещиной нормального отрыва [6, П 2, с. 388] при значениях $\lambda \leq 0,7$ поправочная функция в соответствии с (3) равна

$$f_{IK} = 1,12 - 1,39 \lambda + 7,3 \lambda^2 - 13,0 \lambda^3 + 14,0 \lambda^4;$$

$$f_{IK} = 1,12 - 1,39 \cdot 0,1 + 7,3 \cdot 0,1^2 - 13,0 \cdot 0,1^3 + 14,0 \cdot 0,1^4 = 1,04.$$

По формуле (2) определяем значение коэффициента интенсивности напряжений (подставляя максимальное значение напряжения для сечения, в котором расположена трещина) и сравниваем его со значением критического КИН (вязкости разрушения) K_{IC} .

Значение максимального напряжения рассчитываем по формуле (1), определив максимальный изгибающий момент в сечении, где расположена трещина (см. рис. 1). При этом высота поперечного сечения уменьшилась на значение длины трещины l , т. е. вместо высоты сечения B в формулу (1) подставляем $(B - l)$:

$$M_{\max}^{mp.} = F \cdot (L - a);$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\max}^{mp.} &= \frac{6 \cdot F \cdot (L - a)}{t \cdot (B - l)} = \\ &= \frac{6 \cdot 12 \cdot 10^3 \cdot (2 - 100 \cdot 10^{-3})}{0,02 \cdot (0,2 - 20 \cdot 10^{-3})^2} = 211,1 \text{ МПа}. \end{aligned}$$

Следует отметить, что при определении максимальных напряжений не учитывалось увеличение этих напряжений за счет влияния достаточно «острого» концентратора (в вершине трещины).

Отношение значений напряжений указывает на хрупкое разрушение [1]:

$$\frac{\sigma_{\max}^{mp.}}{\sigma_{0,2}} = \frac{211,1}{320} = 0,66 < 0,70,$$

поэтому КИН определяем по формуле Гриффитса.

Значения критического КИН K_{IC} и условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ определяем по табл. 1 для температуры плюс 20 °С.

В вершине трещины имеем плоское деформированное состояние, т. к.

$$\begin{aligned} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{0,2}} \right)^2 &= \left(\frac{45}{320} \right)^2 = \\ &= 0,0198 \text{ м} < t = 0,02 \text{ м}. \end{aligned}$$

Поэтому в формулу для расчета коэффициента интенсивности напряжений K_I вводим множитель $(1 - \nu^2)$, где ν – коэффициент Пуассона (для стали 15ХСНД примем $\nu = 0,26$).

Тогда для условия нашей задачи

$$\begin{aligned} K_I &= \sigma_{\max}^{mp.} \sqrt{\pi l \cdot (1 - \nu^2)} \cdot f_{IK} = \\ &= 211,1 \sqrt{3,14 \cdot 20 \cdot 10^{-3} (1 - 0,26^2)} \times \\ &\quad \times 1,04 = 53,1 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}. \end{aligned}$$

Безопасность не обеспечивается:
 $K_I = 53,1 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}} > K_{IC} = 45 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$.

Критическая длина трещины для плоского деформированного состояния (ПДС)

$$l_C = \frac{K_{IC}^2}{\pi(\sigma_{\max}^{mp.})^2(1-\nu^2)f_{IK}^2} =$$

$$= \frac{45^2}{3,14 \cdot 211,1^2 \cdot (1-0,26^2) \cdot 1,04^2} =$$

$$= 0,0144 \text{ м.}$$

Выявленная трещина (для ПДС) является опасной, т. к. ее длина превышает критическую длину: $l = 0,02 \text{ м} > l_C = 0,0144 \text{ м}$.

Уточним величины КИН и критической длины трещины с учетом существования зоны пластических деформаций в вершине трещины (по величине $l_{эфф.}$).

Безопасность эксплуатации балки определяем по коэффициенту интенсивности напряжений, сравнивая его значение с K_{IC} материала при заданной температуре. Коэффициент интенсивности напряжений K_I определяем по эффективной длине трещины $l_{эфф.}$:

$$l_{эфф.} = l \left(1 + 0,5 \left(\frac{\sigma_{\max}^{mp.}}{\sigma_{0,2}} \right)^2 \right) =$$

$$= 20 \cdot 10^{-3} \left(1 + 0,5 \left(\frac{211,1}{320} \right)^2 \right) =$$

$$= 0,0244 \text{ м.}$$

В случае плоского деформированного состояния, с учетом существования $l_{эфф.}$

$$K_I = \sigma_{\max}^{mp.} \sqrt{\pi l_{эфф.} \cdot (1-\nu^2)} \cdot f_{IK} =$$

$$= 211,1 \sqrt{3,14 \cdot 0,0244 (1-0,26^2)} \times$$

$$\times 1,04 = 58,7 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$$

Коэффициент интенсивности напряжений значительно превышает его критическое значение: $K_I \gg K_{IC}$. Расчет показывает, что потенциально возможно разрушение балки с выявленной трещиной.

Прежде чем окончательно установить уровень опасности трещины при эксплуатации балки, необходимо разобраться в том, по какой причине появилась трещина, как она выросла до значения $l_{эфф.}$, не продолжится ли ее рост из-за усталости или коррозии и как скоро длина трещины может достигнуть критических размеров.

2.2. Выясняем, насколько будет опасна трещина при понижении температуры до $T = -20 \text{ }^\circ\text{C}$. При понижении температуры разрушение также развивается по квазихрупкому механизму.

Величину поправочной функции f_{IK} определили ранее с учетом отношения $\lambda = l/B$.

По данным табл. 1 определяем:

– критический коэффициент вязкости разрушения K_{IC} для стали 15ХСНД, при температуре минус $20 \text{ }^\circ\text{C}$ $K_{IC} = 59 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$;

– условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, при этой же температуре $\sigma_{0,2} = 340 \text{ МПа}$.

Расчеты проводим по аналогии с п. 2.1.

Проверяем, какое из условий (ПНС (плоское напряженное состояние) или ПДС) будет выполняться:

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{0,2}} \right)^2 = \left(\frac{59}{340} \right)^2 =$$

$$= 0,0301 \text{ м} > t = 0,02 \text{ м.}$$

Следовательно, вершина трещины находится в условиях ПНС.

По отношению напряжений определяем вид разрушения:

$$\frac{\sigma_{\max}^{mp.}}{\sigma_{0,2}} = \frac{211,1}{340} = 0,62 < 0,70.$$

Разрушение хрупкое, используем формулу Гриффитса для ПНС без учета длины зоны пластического деформирования:

$$K_I = \sigma_{\max}^{mp} \cdot \sqrt{\pi l} \cdot f_{IK} = 211,1 \times \\ \times \sqrt{3,14 \cdot 20 \cdot 10^{-3}} \cdot 1,04 = 55,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}};$$

$$l_C = \frac{K_{IC}^2}{\pi (\sigma_{\max}^{mp})^2 f_{IK}^2} = \\ = \frac{59^2}{3,14 \cdot 211,1^2 \cdot 1,04^2} = 0,0239 \text{ м.}$$

Эксплуатация балки является опасной, т. к. значения КИН и длины трещины достаточно близки к их критическим значениям:

$$K_I = 55,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}} < K_{IC} = 59 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}};$$

$$l = 0,02 \text{ м} < l_C = 0,0239 \text{ м.}$$

При учете длины зоны пластического деформирования

$$l_{эфф.} = l \left(1 + 0,5 \left(\frac{\sigma_{\max}^{mp}}{\sigma_{0,2}} \right)^2 \right) = \\ = 20 \cdot 10^{-3} \left(1 + 0,5 \left(\frac{211,1}{340} \right)^2 \right) = 0,0238 \text{ м};$$

$$K_I = \sigma_{\max}^{mp} \cdot \sqrt{\pi l_{эфф.}} \cdot f_{IK} = \\ = 211,1 \sqrt{3,14 \cdot 0,0238} \cdot 1,04 = \\ = 60,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}.$$

В этом случае эксплуатация балки с трещиной заданного размера является еще более опасной.

3. На основе метода конечных элементов, реализованного в пакете прикладных программ SolidWorks, выполнен численный анализ напряженно-деформированного состояния балки с трещиной [12]. Конечно-элементная модель балки показана на рис. 3.

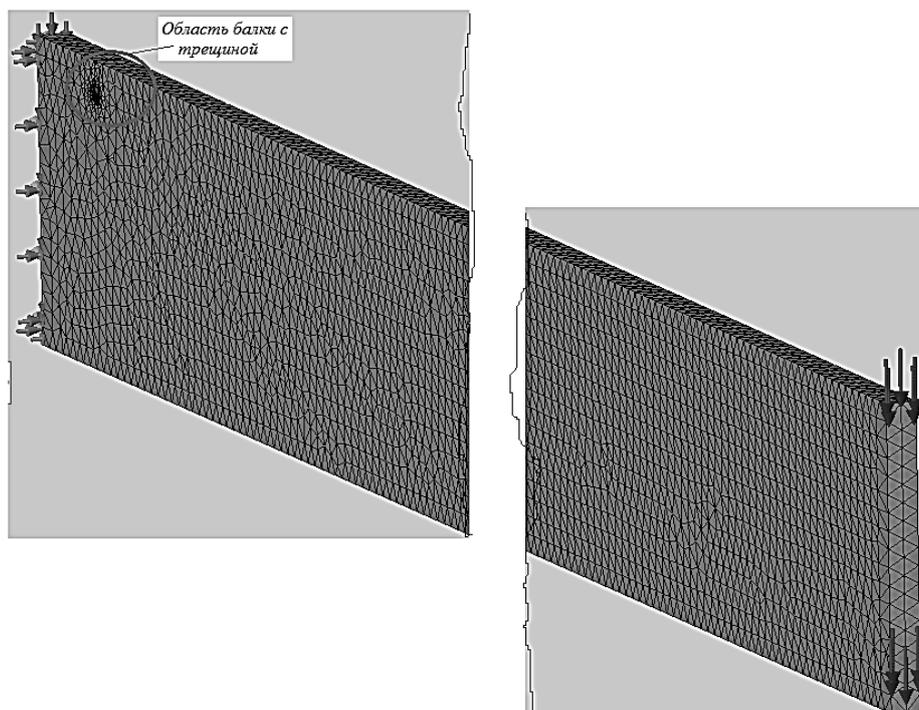


Рис. 3. Конечно-элементная модель консольной балки с трещиной

При формировании модели использовалась процедура формирования конечно-элементной сетки под управлением с целью измельчения ее в области расположения трещины, поскольку в данной зоне имеются значительные градиенты напряжений (рис. 4).

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния данной балки приведены на рис. 5.

Величина напряжений в вершине трещины более 200 МПа (рис. 6), что соответствует результатам теоретических расчетов.

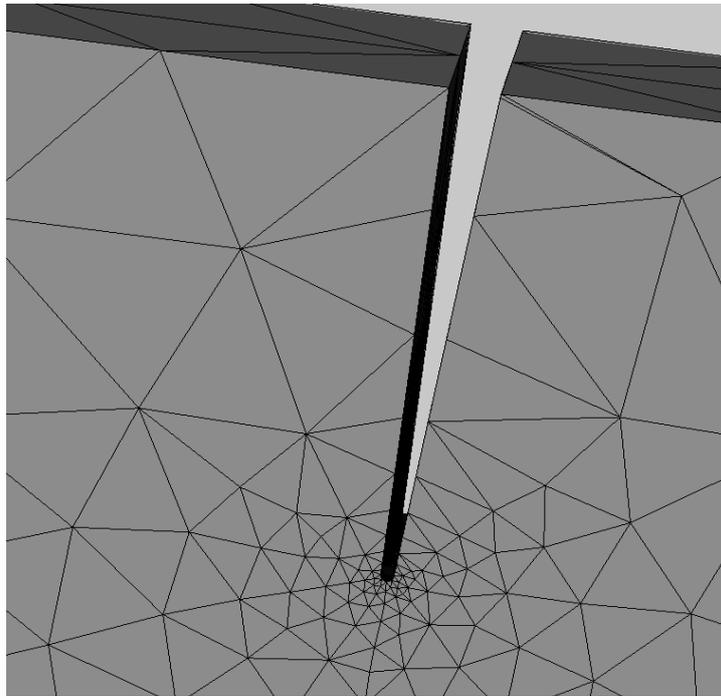


Рис. 4. Конечно-элементная сетка в области балки с трещиной

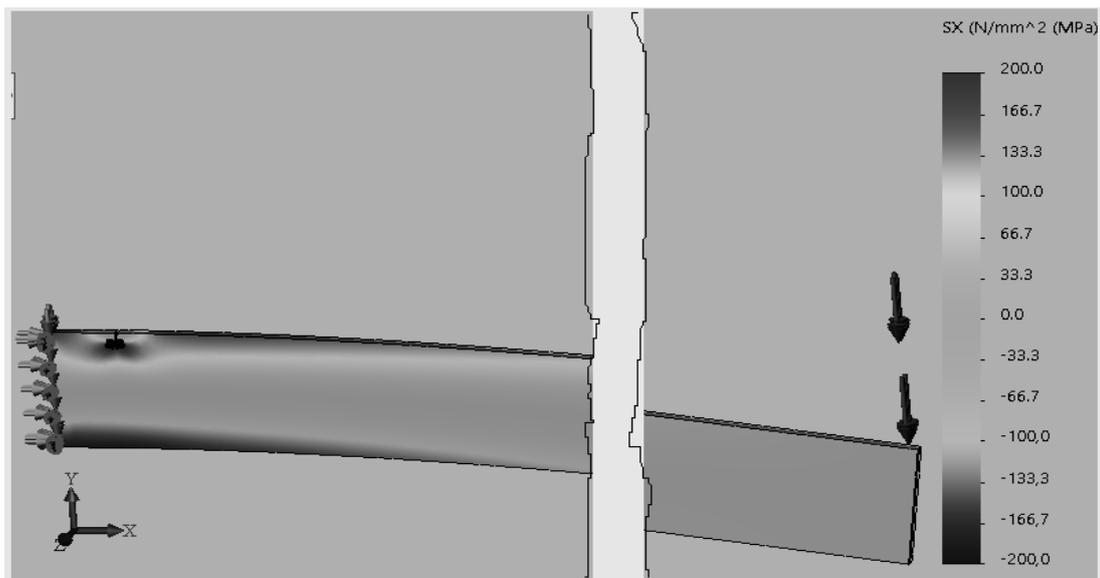


Рис. 5. Эпюра распределения напряжений, перпендикулярных к поперечному сечению балки с трещиной

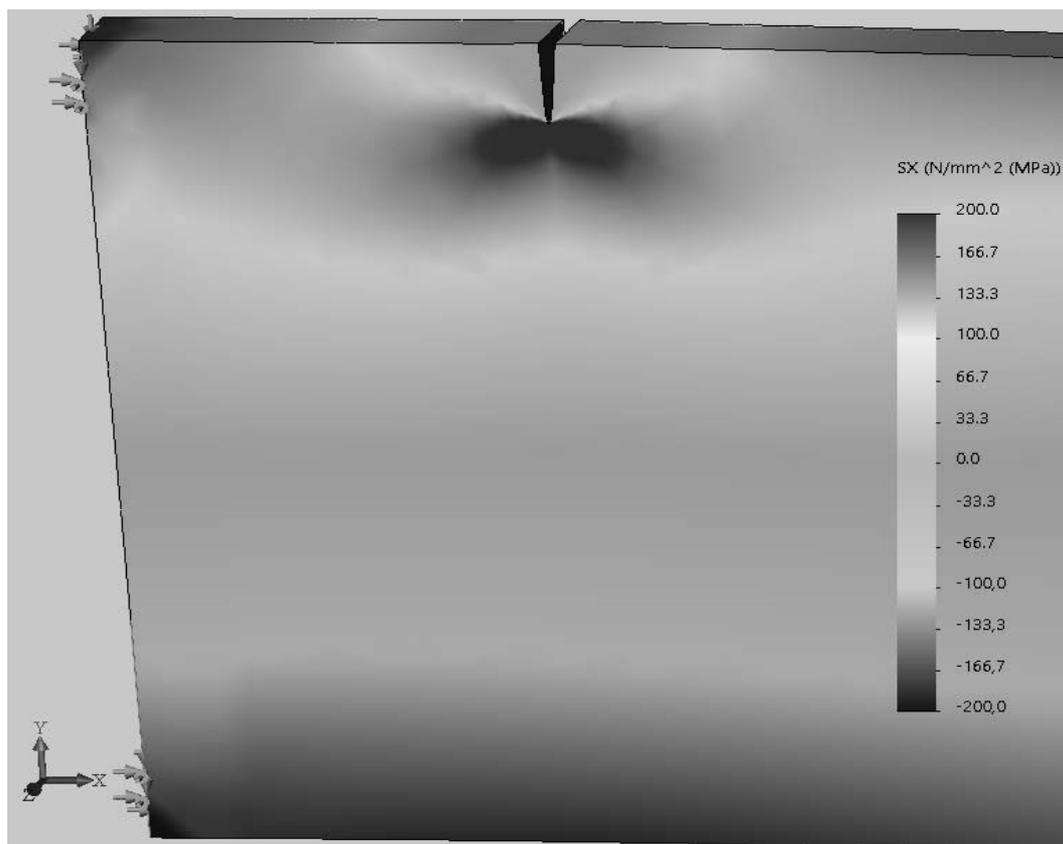


Рис. 6. Распределение напряжений в вершине трещины

Выводы

При отсутствии трещины для заданных механических свойств стали при температуре эксплуатации $T = +20$ °С и величине допускаемого напряжения стали $[\sigma] = 250$ МПа исследуемая балка имеет достаточный запас прочности.

При положительной температуре $T = +20$ °С в вершине трещины реализуется ПДС. Безопасность балки не обеспечивается, т. к. КИН составляет $K_I = 53,1$ МПа $\sqrt{м}$ при его критическом значении $K_{IC} = 45$ МПа $\sqrt{м}$. Выявленная трещина (для ПДС в вершине трещины) является опасной, т. к. ее длина $l = 0,02$ м превышает критическую длину $l_c = 0,0144$ м. Коэффициент интенсивности напряжений значительно превышает его критическое значение. Потенциально возможно разрушение бал-

ки с выявленной трещиной.

При понижении температуры до $T = -20$ °С разрушение развивается по квазихрупкому механизму, вершина трещины находится в условиях ПНС. Эксплуатация балки является опасной, т. к. значения КИН и длины трещины достаточно близки к их критическим значениям: $K_I = 55,0$ МПа $\sqrt{м} < K_{IC} = 59$ МПа $\sqrt{м}$; $l = 0,02$ м $< l_c = 0,0239$ м. С учетом длины зоны пластического деформирования эксплуатация балки с трещиной заданного размера является еще более опасной: $K_I = 60$ МПа $\sqrt{м}$, $l_{эфф.} = 0,0238$ м.

Численный анализ напряженно-деформированного состояния балки с трещиной в среде SolidWorks показал, что величина напряжений в вершине трещины соответствует результатам теоретических расчетов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузменко, И. М. Механика разрушения: учебное пособие / И. М. Кузменко. – Могилев: МГТУ, 2001. – 172 с.
2. Партон, В. З. Механика упругопластического разрушения. Основы механики разрушения: учебное пособие / В. З. Партон, Е. М. Морозов. – 3-е изд., испр. – Москва: ЛКИ, 2008. – 352 с.
3. Работнов, Ю. Н. Введение в механику разрушения / Ю. Н. Работнов. – Москва: Наука, 1987. – 80 с.
4. Пестриков, В. М. Механика разрушения твердых тел. Курс лекций / В. М. Пестриков, Е. М. Морозов. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2002. – 320 с.
5. Механика разрушения и прочность материалов: справочное пособие: в 4 т. / Под общ. ред. В. В. Панасюка. – Киев: Наукова думка, 1990. – Т. 3. – 436 с.
6. Пестриков, В. М. Механика разрушения на базе компьютерных технологий. Практикум / В. М. Пестриков, Е. М. Морозов. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2007. – 464 с.
7. Александров, А. В. Сопротивление материалов: учебник / А. В. Александров, В. Д. Потапов, Б. П. Державин. – 2-е изд., испр. – Москва: Высшая школа, 2000. – 560 с.
8. Окопный, Ю. А. Механика материалов и конструкций: учебник / Ю. А. Окопный, В. П. Радин, В. П. Чирков. – 2-е изд., доп. – Москва: Машиностроение, 2002. – 436 с.
9. Писаренко, Г. С. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, Ф. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – 5-е изд., перераб. и доп. – Киев: Дельта, 2008. – 816 с.
10. Подскребко, М. Д. Сопротивление материалов: учебник / М. Д. Подскребко. – Минск: Высшая школа, 2007. – 797 с.
11. Старовойтов, Э. И. Сопротивление материалов: учебник / Э. И. Старовойтов. – Москва: Физматлит, 2008. – 384 с.
12. Кузменко, И. М. Оценка трещиностойкости элементов конструкций, имеющих дефекты в виде трещин / И. М. Кузменко, В. А. Попковский, А. Д. Крижевский // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2023. – С. 139–140.

Статья сдана в редакцию 9 июня 2023 года

Контакты:

kuzmenko_im43@mail.ru (Кузменко Игорь Михайлович);
viktorpopkovski@mail.ru (Попковский Виктор Александрович);
kararkas@mail.ru (Крижевский Андрей Дмитриевич).

I. M. KUZMENKO, V. A. POPKOVSKY, A. D. KRIZHEVSKY

FRACTURE RESISTANCE OF THE CANTILEVER BEAM WITH AN EDGE CRACK ON THE SURFACE

Abstract

An analysis of fracture resistance of a cantilever beam with a crack located near the embedment is presented. Based on the methods of fracture mechanics, critical parameters characterizing features of the beam fracture at different temperatures are determined.

Keywords:

crack, critical stresses, stress intensity factor, effective crack length, finite element model.

For citation:

Kuzmenko, I. M. Fracture resistance of the cantilever beam with an edge crack on the surface / I. M. Kuzmenko, V. A. Popkovsky, A. D. Krizhevsky // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 3 (80). – P. 26–34.

DOI: 10.53078/20778481_2023_3_35

УДК 621.876.11, 658.512.2, 7.05, 747.023.7, 747.012

А. В. КУЦЕПОЛЕНКО

М. Э. ПОДЫМАКО

Е. Н. ЗАЯЦ

ОАО «Могилевлифтмаш» (Могилев, Беларусь)

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ДИЗАЙНЕ ПАНОРАМНОГО ЛИФТА

Аннотация

Рассмотрено развитие промышленного дизайна, в частности, в области дизайна панорамных лифтов и лифтового оборудования, находящегося внутри прозрачной шахты. Отмечена тенденция максимального увеличения степени остекления панорамных лифтов (вплоть до 360°). Определено, что одним из основных «раздражителей» в стеклянной шахте является противовес кабины лифта. Проанализированы способы снижения его негативного влияния на внешний вид панорамного лифта. Предложена концепция прозрачного противовеса, максимально соответствующая дизайну панорамного лифта (представлена в Москве на Международной выставке лифтов и подъемного оборудования «Russian Elevator Week – 2023»). Данная концепция обобщена и предложено направление противовесов со светопроницаемыми грузами, что позволяет повысить эстетическую привлекательность уже существующих противовесов с бетонными грузами за счет использования прозрачного бетона Litrasop.

Ключевые слова:

промышленный дизайн, интерьер, экстерьер, стеклянная архитектура, панорамный лифт, прозрачная шахта лифта, прозрачная кабина лифта, противовес лифта, стекольная промышленность, бетонный груз, прозрачный бетон Litrasop, светопроницающий материал.

Для цитирования:

Куцепенко, А. В. Современные тенденции в дизайне панорамного лифта / А. В. Куцепенко, М. Э. Подымако, Е. Н. Заяц // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 3 (80). – С. 35–47.

Введение

Во всем мире крупнейшие производственные компании, занимающие лидирующие позиции в своих сферах, при проведении научно-исследовательских работ с каждым годом все большее внимание уделяют промышленному дизайну, что позволяет им производить высококонкурентный и высокорентабельный продукт (продукт с большой добавленной стоимостью). При этом требуемые материальные и временные вложения гораздо меньше, чем при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, направленных на совершенствование конструкции или технологии производства [1]. Это особенно заметно в сферах производства интерьерных продуктов

(например, мебели), а также в сфере транспортных систем (автомобилестроение) или компьютерных игр. Данная тенденция (тренд) начинает оказывать все большее влияние и в лифтовой отрасли. Это отражается в огромном количестве различных решений по художественному оформлению внутреннего пространства кабины. В случае панорамных лифтов объектом дизайна может быть не только внутреннее пространство кабины или этажные двери шахты и их обрамление, ведь такой лифт и его шахта, а также оборудование, размещаемое в ней, становятся частью интерьера или экстерьера здания. Таким образом, панорамные лифты и соответствующие им прозрачные шахты значительно расширяют сферу дизайна в лифтовой отрасли. Узлы, кото-

рые ранее никому, кроме монтажников и обслуживающего персонала, не были видны, потому что находились в лифтовой шахте, теперь становятся полноценными объектами дизайна. Несмотря на то, что это веянье в дизайне панорамных лифтов сравнительно новое и непривычное, стремление дизайнеров максимально интегрировать такие лифты в интерьер или экстерьер здания неизбежно приведет к скорому развитию данного направления. При этом в настоящее время панорамные лифты перестают быть редкостью и завоевывают все новые и новые области применения, а их степень остекления постоянно возрастает.

В результате приходим к выводу, что для того чтобы иметь успех на рынке, современный производитель должен научиться уделять внимание таким непривычным для отечественно-

го производителя понятиям, как дизайн, маркетинг и бренд.

Основная часть

В современных лифтах дизайн играет важнейшую, после обеспечения безопасности, роль. Классическим (привычным) объектом дизайна в лифтах является внутреннее пространство кабины. В этом плане мелочей или неважных объектов не осталось. Практически все элементы кабины (панели, пол, потолок, панель управления и кнопки управления) участвуют в создании целостной картины, отражающей мысль дизайнера. В качестве примера можно рассмотреть современные дизайнерские лифты производства ОАО «Могилевлифтмаш» (рис. 1), представленные ранее в журнале «Лифтинформ» [2].

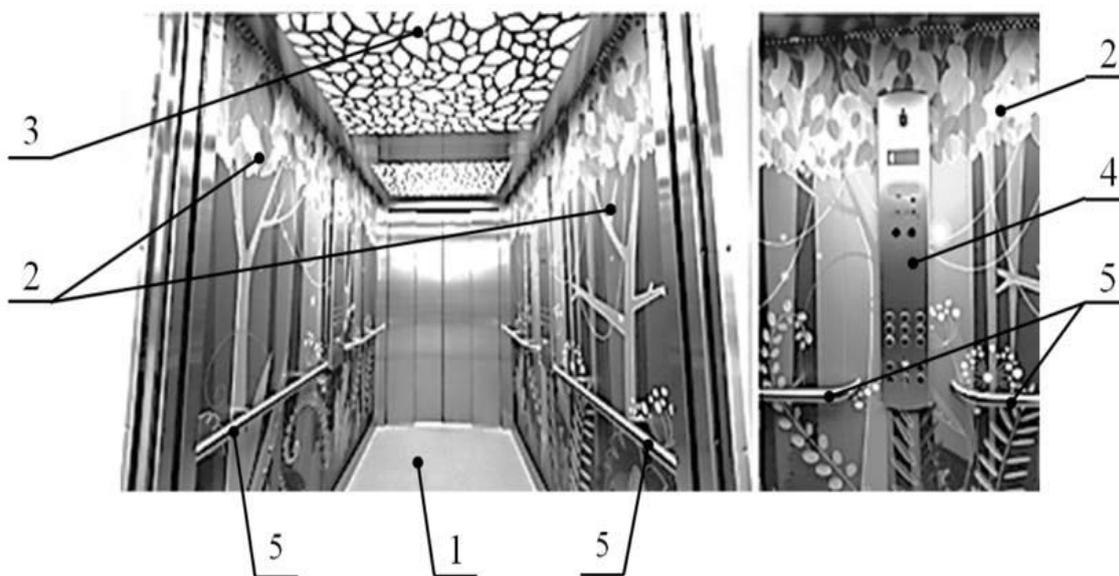


Рис. 1. Кабина лифта для детского учреждения производства ОАО «Могилевлифтмаш»: 1 – пол; 2 – УФ-печать на стеновых панелях кабины; 3 – рисунок на потолке (освещении); 4 – панель управления; 5 – поручень

Дизайнер учитывает специфику учреждения, в котором установлен лифт, что определяет направление, в котором он ищет решения по оформлению внутреннего пространства каби-

ны лифта. Например, для государственного учреждения юридического профиля более подходящими будут решения по оформлению кабины в строгом классическом стиле, а для детского учре-

ждения (садика, школы, детской больницы) требуются кардинально иные решения. Кроме того, на будущий дизайн лифта может оказывать влияние архитектурный стиль здания, в котором он должен быть установлен. Например, в историческом музее или старинном замке, чтобы не нарушать художественный образ, лифт может быть стилизован под внутренний интерьер здания, и даже двери шахты могут быть выполнены похожими на двери комнат.

В современной архитектуре все большее распространение и популярность получают здания со светопрозрачными фасадами за счет высокой эстетической выразительности стекла, применяемого в качестве конструкционного материала [3], а также атриумные здания, центральное пространство которых имеет вертикальную направленность, а прозрачный купол способствует насыщению пространства светом и воздухом [4]. Использование в атриуме здания стеклянных элементов подчеркивает легкость, воздушность конструкции и обеспечивает насыщение

внутреннего пространства здания светом. Можно резюмировать, что развитие архитектуры современных офисных и многофункциональных зданий связано с все более широким применением стекла и высокой популярностью во многих развитых (США, Япония), а также динамично развивающихся (КНР, Южная Корея, ОАЭ) странах так называемой «стеклянной архитектуры».

Появление панорамного лифта и соответствующей лифтовой шахты, с частичным или полным остеклением, позволило обозревать интерьер или экстерьер здания в зависимости от того, расположен лифт внутри или снаружи здания (рис. 2).

При этом независимо от расположения панорамного лифта существует тенденция использовать лифты с максимальной степенью остекления – 360° (рис. 3). Прозрачные стены и дверь кабины позволяют обеспечить обзорность до 360°, причем даже пол кабины и/или ее потолок также могут быть прозрачными.

а)



б)



Рис. 2. Экстерьерные (Pappas Elevators) [5] и интерьерные (Kone Corporation) [6] панорамные лифты: а – экстерьерный панорамный лифт (расположен снаружи здания); б – интерьерный панорамный лифт (расположен в атриуме здания)

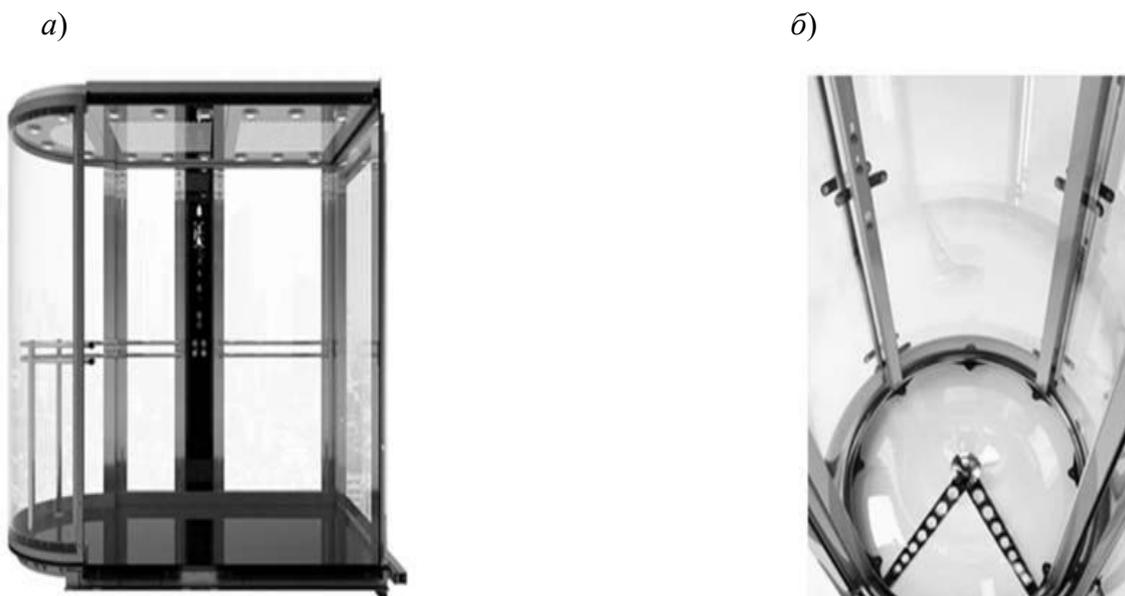


Рис. 3. Примеры панорамных лифтов с максимальной обзорностью: *а* – панорамный лифт с прозрачными стенами и дверями производства ОАО «Могилевлифтмаш» [7]; *б* – коттеджный лифт с прозрачными стенами, дверями и полом производства фирмы «М-Систем» [8]

Происходит процесс не одностороннего, а взаимного влияния лифтового оборудования панорамного лифта и стиля интерьера здания на дизайн каждого из них.

Поэтому внешний вид обзорных лифтов имеет очень важное значение, т. к. практически вся масса посетителей здания пользуется лифтом, который может выполнять роль своеобразной «визитной карточки». Стекланные кабина и шахта лифтов, своей визуальной легкостью и прозрачностью, могут вносить в архитектуру здания элемент легкости и движения, позитивно настраивать посетителей перед предстоящими переговорами или помочь расслабиться после напряженных стрессовых переговоров [9]. При этом стремление дизайнеров максимально интегрировать обзорный лифт в архитектурно-художественное решение здания втянуло в поле зрения дизайнера те элементы лифтового оборудования, которые ранее не рассматривались в качестве объекта для промышленного ди-

зайна и, соответственно, их внешний вид не имел никакого значения. Речь идет об узлах лифта, которые располагаются в лифтовой шахте. Так как в прозрачной шахте они становятся видны, то их стараются сделать менее заметными и не привлекающими внимание. Например, что касается лифтового оборудования, размещаемого в прямке прозрачной шахты, то для придания узлам эстетического вида чаще всего используют окрашивание их в светлые или нейтральные тона. Как правило, это оказывается достаточным, т. к. данные устройства, например буфера, имеют малые габариты и, по большей части, статичны, поэтому они не привлекают к себе особого внимания.

Оборудование, расположенное в верхней части шахты, также статично. К тому же оно находится на значительном расстоянии от пассажира лифта или посетителя здания, поэтому не привлекает к себе большого внимания.

Отдельным «раздражителем», привлекающим к себе внимание в стек-

лянной шахте, является противовес кабины лифта. Он имеет габариты, сравнимые с размерами кабины, и, как и кабина, перемещается вдоль всей шахты. Кроме того, перемещаясь напротив прозрачной кабины лифта, противовес еще и снижает ее обзорность. На сегодняшний день производители лифтов пытаются решать данную проблему различными путями:

1) выпускают лифты без противовеса [10];

2) стену шахты, вдоль которой перемещается противовес, и прилегающую к ней сторону лифтовой кабины выполняют непрозрачными [11, 12];

3) придают противовесу привле-

кательный вид, например, закрывая груза противовеса щитами [13]. Для большей привлекательности эти щиты могут быть выполнены из нержавеющей стали и/или иметь декоративные прорези и надписи. Также на противовесе могут располагаться рекламные плакаты;

4) выполняют противовес такой конструкции, которая не препятствует обзору;

5) располагают противовес ниже кабины лифта.

Первое решение применимо для лифтов с малой грузоподъемностью. Как правило, это коттеджные лифты (рис. 4).



Рис. 4. Панорамные лифты малой грузоподъемности без противовеса кабины (коттеджные лифты) фирмы «М-Систем»

Второе решение позволяет скрыть противовес за непрозрачной частью кабины. В качестве примера можно рассмотреть лифты производства фирмы DomusLift (Италия) [11, с. 4] и фирмы IconLift (Италия) [12, с. 3], представленные на рис. 5. Также в [14, с. 57–58] приводится похожий анализ схем экстерьерных обзорных лифтов фирмы Toshiba Elevator and Building Systems Corporation, на которых видно, что про-

тивовес размещается напротив непрозрачной стенки кабины.

Третье решение применимо для лифтов любой грузоподъемности, однако при закрывании грузов противовеса декоративными щитами [13] усложняется процесс выявления внутренних трещин грузов при их визуальном осмотре в ходе планового технического обслуживания лифта [15].

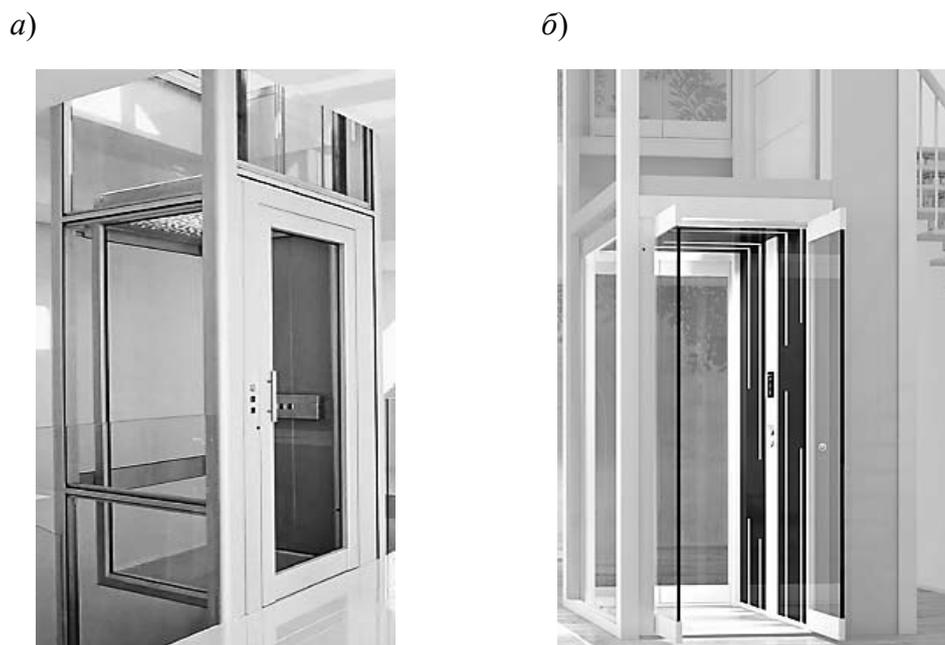


Рис. 5. Коттеджные лифты с одной непрозрачной стороной: *а* – коттеджный лифт фирмы DomusLift (Италия); *б* – коттеджный лифт фирмы IconLift (Италия)

Для того чтобы обеспечить возможность проведения осмотра грузов без демонтажа декоративно-защитных щитов, последние могут выполняться из прозрачных материалов. Но в любом случае применение декоративных щитов, закрывающих противовес целиком или только его грузы, не решает проблему в целом, а лишь сглаживает негативный эффект. Выполнение шахты и кабины лифта прозрачными дает возможность пассажирам насладиться видом на окружающее пространство, но перемещающийся напротив кабины противовес не просто отвлекает на себя внимание, а является прямой противоположностью кажущейся воздушной и невесомой прозрачной кабине. Наличие противовеса разрушает целостную картину, создаваемую прозрачными стенами здания, шахты и прозрачной кабиной лифта. Ярким примером третьего решения является лифт фирмы «М-Систем» в исполнении с противовесом (рис. 6) [8].

Примером четвертого решения может быть конструкция противовеса,

предложенная в патенте фирмы Mitsubishi Electric Corp. (Япония) [16]. В данном патенте противовес выполнен в виде рамки, а его грузы расположены вдоль боковых стоек, соединяющих верхнюю и нижнюю балки противовеса (рис. 7, *а*). В результате центральная часть противовеса является пустотелой, поэтому он не ухудшает обзор панорамной кабины. Однако такой противовес будет обладать увеличенной шириной и удвоенным количеством подвесных шкивов.

В [17, 18] предложено использовать два противовеса, связанных с кабиной лифта, и располагать их внутри угловых стоек лифтовой шахты. Однако это усложняет конструкцию шахты и систему подвеса кабины.

Примером пятого решения может быть конструкция противовеса, представленная в [19]. Его суть заключается в том, что шахту для противовеса делают глубже шахты кабины лифта, благодаря чему противовес всегда находится ниже кабины лифта.



Рис. 6. Панорамный лифт большой грузоподъемности с противовесом кабины фирмы «М-Систем», грузы которого закрыты декоративными стальными щитами

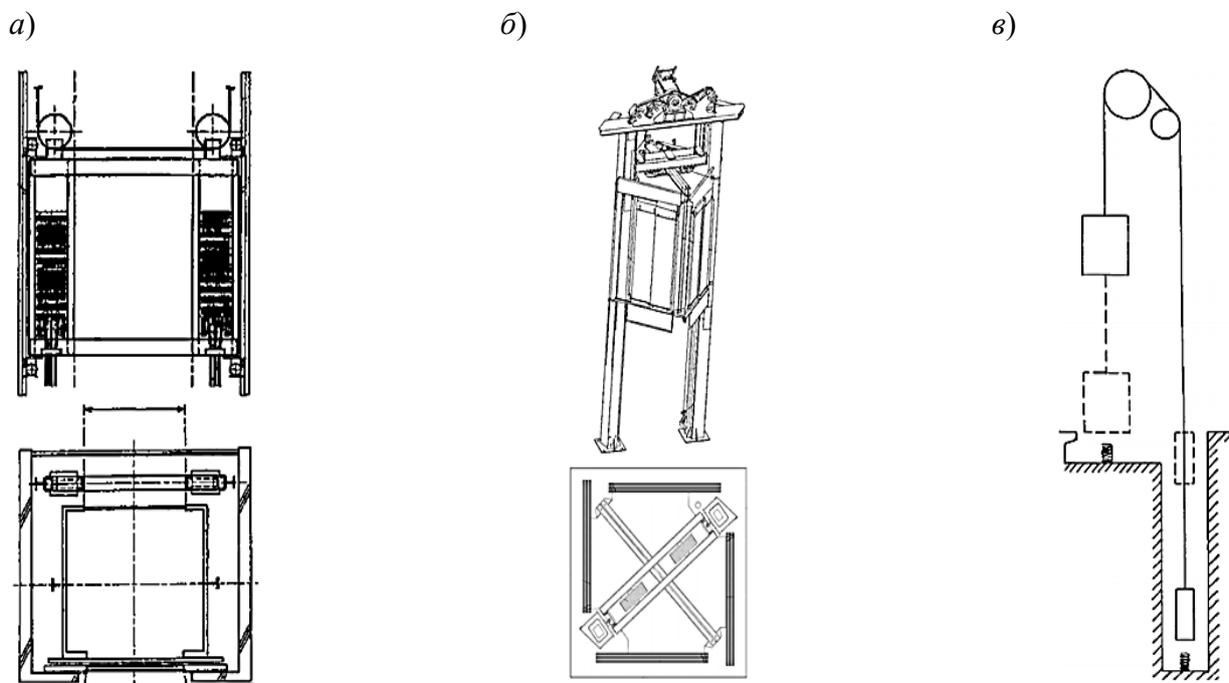


Рис. 7. Варианты решений для уменьшения влияния противовеса на обзорность панорамных лифтов: а – противовес, центральная часть которого является пустотелой [16]; б – противовес, расположенный внутри угловых стоек лифтовой шахты [17, 18]; в – противовес, шахта которого расположена ниже шахты кабины лифта [19]

Специалистами Научно-технического центра ОАО «Могилевлифтмаш» предложена концепция прозрачного противовеса, которая была воплощена в выставочном образце (рис. 8) и пред-

ставлена на Международной выставке лифтов и подъемного оборудования «Russian Elevator Week – 2023» в Москве [20].



Рис. 8. Прозрачный противовес ОАО «Могилевлифтмаш» на Международной выставке лифтов и подъемного оборудования «Russian Elevator Week – 2023» в Москве

На первый взгляд, с технической точки зрения, данное направление представляется нереальным и невыполнимым. Однако в этом и состоит стратегическая роль (задача) дизайнера в промышленном производстве – быть законодателем мод и предлагать решения, которые кажутся невыполнимыми. Смелые и свежие идеи должны задавать направление развития конструкторам, технологам и производству. Это очень сложная задача, однако именно ведущая роль дизайнера при проектировании позволяет получать качественно новый продукт. Но для этого нужно развивать принципиально новую проектную культуру [21].

На прозрачный противовес накладываются взаимоисключающие требования. Ведь, несмотря на прозрачность, такой противовес должен выполнять свои функции – обладать необходимой массой, при этом выдерживать нагрузки, возникающие при каждодневной

эксплуатации противовеса, а также при аварийной посадке его на буфер. Действительно, большинство прозрачных материалов обладают меньшей плотностью, по сравнению с бетоном, а стекло, несмотря на близкую с бетоном плотность, является хрупким материалом.

Однако можно вспомнить, что светопрозрачные конструкции в архитектуре, которые сегодня переживают повторную популярность, в 70-х гг. XX в. столкнулись с рядом технических проблем, что привело к временному спаду их производства и популярности вплоть до конца 80-х гг. (рис. 9). Это произошло из-за того, что архитектурные идеи стеклянной архитектуры, популярные в 1920–1960-х гг., значительно опережали имеющиеся на то время технологические возможности и уровень научных знаний, что привело к необходимости капитального ремонта построенных небоскребов со стеклянным фасадом [22].

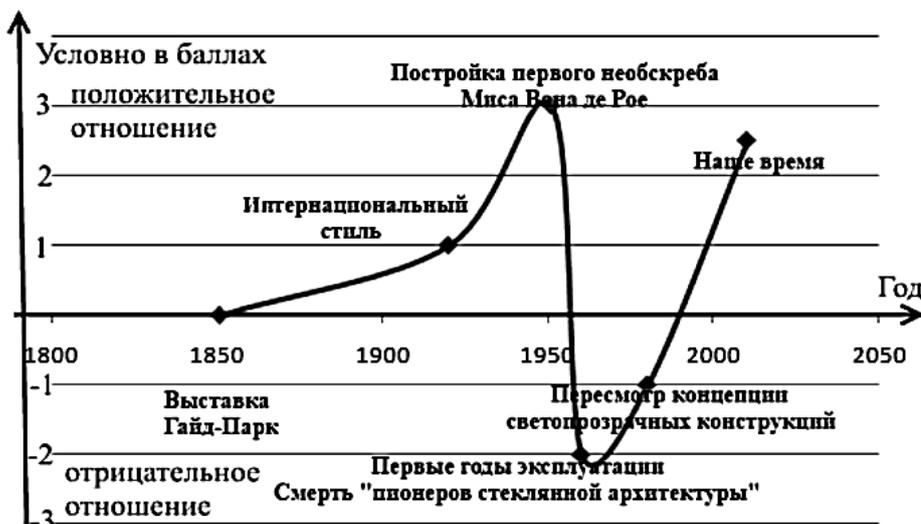


Рис. 9. График изменения популярности светопрозрачных конструкций в архитектуре [22]

Сегодня технический прогресс и бурное развитие стекольной промышленности вновь сделало стекло популярным и востребованным строительным материалом, что позволяет строить даже такие сложные объекты, как стеклянные мосты [23]. При этом, помимо недостатков, стекло как материал имеет ряд достоинств:

- 1) высокоэстетичность;
- 2) ассоциативность с высокотехнологичным продуктом. Сегодня стекло и изделия из него являются современным стайлингом;
- 3) экологичность (отсутствие грибков и плесени);
- 4) влагуустойчивость;
- 5) постоянство плотности;
- 6) гладкая поверхность стекла легко моется.

При этом вариативность дизайна оформления изделий из стекла [24] и, в частности, прозрачного противовеса практически не лимитирована – степень прозрачности может быть различной или иметь разные цветовые оттенки. Может применяться стекло различных видов: опаловое (молочное) стекло, фотохроматическое стекло (темнеет при сильном ярком освещении и наоборот), безбликовое стекло, узорча-

тое стекло, стекло с расположенными внутри узорами или пузырями, стекло с нанесенным снаружи или внутри рисунком (рисунок на пленке ПВХ, гравировка), армированное стекло, стеклокерамика.

Можно провести своеобразную параллель – не так давно (1980-е гг.) конструкторы переходили с чугунных грузов на железобетонные [25], которые обладали значительно меньшими плотностью и прочностью. Однако технические проблемы были решены и на сегодняшний день бетонные грузы широко распространены. Возможно, что применение стеклянных грузов потребует разработки специального стекла с заданными свойствами или специальных пленок для изготовления триплексного [26] стеклянного блока повышенной прочности. Возможно, потребуется разработать новую конструкцию противовеса, конструктивные особенности которого ограничат передачу нагрузки на стеклянные грузы при посадке противовеса на буфер. В представленном на выставке выставочном экспонате прозрачного противовеса грузы выполнены сборными из стеклянных блоков, изготовленных из стекла-триплекса. Планируются его заводские стендовые испы-

тания на прочность грузов с различным типом грузов – цельным триплексованным и сборным триплексованным, а также с каленым и некаленным стеклом. Проведение таких испытаний даст количественную и качественную оценку прочности грузов и позволит либо предложить новую конструкцию противовеса, либо новую конструкцию грузов, либо определить необходимые требования к стеклу, из которого изготовлены грузы, для того чтобы получить работоспособный прозрачный противовес. В этом направлении предстоит еще много работы. Коллектив Научно-технического центра ОАО «Могилевлифтмаш» находится только в начале пути.

Благодаря проведенной работе по разработке и изготовлению выставочного образца сегодня попутно получено другое решение, касающееся светопропускающего материала, из которого могут изготавливаться грузы для любых противовесов, включая выпускаемые серийно. В последнее время в строительстве зданий и сооружений начал применяться прозрачный бетон (так называемый Litracon) [27, 28]. Конечно, прозрачный бетон, несмотря на свое название, не является прозрачным, однако, в отличие от классического бетона, Litracon – светопропускающий материал. При освещении прозрачного бетона источником света можно видеть силуэт предмета, находящегося за ним. При этом его прочность близка к прочности традиционного бетона, а внешний вид противовеса, у которого грузы выполнены из прозрачного бетона, при наличии на противовесе «местного, своего» источника света (например, светодиодная лента), становится намного привлекательнее. Использование прозрачного бетона для изготовления грузов противовеса может иметь и практическую ценность. Как указано в инструкции, приложенной к руководству по эксплуатации лифта, обслуживающая лифт организация, для предотвра-

щения аварийных случаев, должна периодически проводить работы по техническому обслуживанию и осмотру лифта. В рамках периодического технического обслуживания и осмотра лифта, наряду со всеми узлами лифта, должен проверяться и противовес. Одним из проверяемых параметров является проверка состояния грузов (их целостности, отсутствие трещин), особенно для грузов, получаемых методом литья, – железобетонных, бетонных или чугунных [15]. При этом выявить внутренние трещины при визуальном осмотре грузов противовеса невозможно, а в случае трещин, находящихся на поверхности груза, – затруднительно определить глубину и направление трещины, что не позволяет судить о степени ее опасности. Поэтому, в случае изготовления грузов противовеса из светопропускающего материала, например Litracon, просвечивая грузы источником света, можно выявлять (видеть) внутренние трещины, определять глубину трещин, находящихся на поверхности груза, а также их направление. Таким образом, персонал, обслуживающий лифт, во время планового визуального контроля (осмотра) противовеса будет иметь возможность, просвечивая грузы противовеса источником света, выявлять поврежденные грузы. Это позволит заблаговременно производить замену поврежденного груза, снижая вероятность его выпадения во время эксплуатации лифта, что повысит в целом надежность и безопасность лифта.

Для того чтобы защитить предложенную концепцию прозрачного противовеса для панорамного лифта, коллективом НТЦ ОАО «Могилевлифтмаш» была подана заявка на полезную модель Республики Беларусь № u20230120. При этом в этой заявке подан противовес лифта, у которого грузы выполнены из светопропускающего материала, что позволяет получить интеллектуальную защиту и для прозрачного противовеса, который является, по сути, частным

случаем противовеса с грузами из свето пропускающего материала. Данная заявка оставляет возможность маневра как для конструктора, так и для дизайнера. Ведь конструкция противовеса или его грузов может быть совершенно разной, а сам свето пропускающий материал иметь любую степень свето пропускания, вплоть до максимальной прозрачности.

Заключение

Развитие современной архитектуры доказывает, что стеклу, этому необычайно легко приспособляемому материалу, который так долго и в таких разнообразных формах служит человечеству, предстоит еще расширять сферу применения. В развитии стекла все явственнее проявляют себя нанотехнологии, позволяющие придать ему специ-

фические эксплуатационные и технические характеристики, а также экстраординарные эстетические качества. Стекло всегда будет одним из основных строительных материалов. Но сегодня оно стало еще и модным. Эта мода пришла и в лифтовую отрасль, что выражается в развитии направления панорамных лифтов и прозрачных лифтовых шахт. В свою очередь это требует от дизайнеров обратить внимание на объекты лифтового оборудования, на которые в обычных лифтах с непрозрачной шахтой внимание дизайнеров не распространялось. Логичным развитием прозрачной кабины лифта и шахты может стать прозрачный противовес. Сегодня это смелое решение является дизайнерской фантазией, но в будущем может стать реальностью. Для этого нужно начинать работать в данном направлении уже сегодня.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Промышленный дизайн (Стандарты. Лучшая практика. Продьюсинг. Дизайн-школы): издание подготовлено в рамках проекта «Промышленный и технологический форсайт Российской Федерации на долгосрочную перспективу», инициированного Министерством промышленности и торговли Российской Федерации / Г. Э. Афанасьев [и др.]; под ред. В. Н. Княгинина. – Санкт-Петербург: Центр стратегических разработок «Северо-Запад, 2012. – 65 с.
2. Лифт как объект дизайна / К. Е. Гросс [и др.] // Лифтинформ. – 2022. – № 4 (295). – С. 31–36.
3. **Дербина, С. Н.** Эволюция конструктивных решений светопрозрачных фасадов / С. Н. Дербина, П. В. Борискина, А. А. Плотников // Вестн. МГСУ. – 2011. – № 2-2. – С. 26.
4. **Баушева, М. Д.** Эволюция атриумных пространств: от элемента древней жилищной архитектуры до ключевого элемента в композиции современных гостиниц / М. Д. Баушева // Изв. Казан. гос. архит.-строит. ун-та. – 2011. – № 4 (18). – С. 16–22.
5. Pappas elevators. Panoramic series «яркая сторона лифта» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://lift-import.ru/upload/iblock/fcb/fcb60385d234dc3914dd2e4f0b53ef87.pdf>. – Дата доступа: 05.06.2023.
6. Панорамные лифты Kone с машинным и без машинного помещения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://liftes.com.ua/images/advantages/advantagesfile/panoramnie-lifti-kone.pdf>. – Дата доступа: 05.06.2023.
7. Высота под контролем. ОАО «МОГИЛЕВЛИФТМАШ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.liftmach.by/upload/iblock/%D0%9A%D0%B0%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B3%20%D0%9C%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D0%BB%D0%B5%D0%B2%D0%BB%D0%B8%D1%84%D1%82%D0%BC%D0%B0%D1%88%20sm.pdf>. – Дата доступа: 01.06.2023.
8. Стекланный уличный лифт М-Систем прямо на фасаде здания [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=OcQafsbOE5g>. – Дата доступа: 02.06.2023.
9. **Лойко, А. И.** Философия дизайнера: учебно-методическое пособие / А. И. Лойко, Е. К. Булыго, Е. Б. Якимович. – Минск : БНТУ, 2017. – 74 с.
10. М-Систем – завод панорамных лифтов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://m-system-elevators.ru/images/files/prezent2022.pdf>. – Дата доступа: 26.06.2023.
11. DomusLift. Ваш персональный лифт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.afonska.ru/public/image/katalog_pdf_ivg/igv-domuslift-2019-rus.pdf. – Дата доступа: 02.06.2023.

12. IconLift. Superlative homelift for your home. LIFTINGITALIA. Comfortable homelifts [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.graandprix.com/pdf/lifting-italia-icon-lift.pdf>. – Date of access: 26.06.2023.
13. Counterweight device of lift system [Electronic resource]: pat. CN 201567130 (U) / W. U. Mingzhang. – Publ. date 01.09.2010. – Mode of access: https://ru.espacenet.com/publicationDetails/biblio?FT=D&date=20100901&DB=&locale=ru_RU&CC=CN&NR=201567130U&KC=U&ND=5. – Date of access: 26.06.2023.
14. **Лазовская, Н. А.** Инженерное обеспечение объектов архитектуры, градостроительства и ландшафтной архитектуры: учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-69 01 01 «Архитектура» / Н. А. Лазовская, А. В. Мазаник. – Минск : БНТУ, 2004. – 72 с.
15. Лифт пассажирский ЛП-0401К. Руководство по эксплуатации 0401К.00.00.000 РЭ. ОАО «МОГИЛЕВЛИФТМАШ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.liftmach.by/upload/iblock/%D0%9B%D0%9F-0401%D0%9A.pdf>. – Дата доступа: 05.06.2023.
16. Counterweight device for viewing elevator [Electronic resource]: pat. JP 2015020828 (A) / Т. Kobayashi, К. Fuse, К. Fukatsu. – Publ. date 02.02.2015. – Mode of access: https://ru.espacenet.com/publicationDetails/biblio?FT=D&date=20150202&DB=EPODOC&locale=ru_RU&CC=JP&NR=2015020828A&KC=A&ND=4. – Date of access: 26.06.2023.
17. Four-surface-open panoramic lift without machine room [Electronic resource]: pat. CN 203903731 (U) / R. Zhou, S. Zhang, F. Zhu, L. Bo. – Publ. date 29.10.2014. – Mode of access: https://ru.espacenet.com/publicationDetails/biblio?FT=D&date=20141029&DB=&locale=ru_RU&CC=CN&NR=203903731U&KC=U&ND=4. – Date of access: 27.06.2023.
18. Counterweight arrangement structure in elevator traction system [Electronic resource]: pat. CN 109665416 (A) / Q. Chen, J. Deng, J. Li. – Publ. date 23.04.2019. – Mode of access: https://ru.espacenet.com/publicationDetails/biblio?FT=D&date=20190423&DB=&locale=ru_RU&CC=CN&NR=109665416A&KC=A&ND=4. – Date of access: 27.06.2023.
19. The elevator system [Electronic resource]: pat. JP S59-046965 / A. Sumimoto. – Publ. date 28.03.1983. – Mode of access: <https://www.j-platpat.inpit.go.jp/c1800/PU/JP-S59-046965/92B0365D27B7C3CEFC351442162913CC21351465EF1B8C05FBFB3ADDB52DFE52/23/ja>. – Date of access: 27.06.2023.
20. МогилевлифтмашLIFE. Jun 7 at 12:01 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://t.me/mogilevliftmashlive/6442?single>. – Дата доступа: 27.06.2023.
21. **Лапшина, Е. А.** Перспективы развития промышленного дизайна на базе инженерного образования / Е. А. Лапшина // Вестн. Инж. шк. Дальневост. федер. ун-та. – 2015. – № 3 (24). – С. 62–77.
22. **Болдырев, А. С.** «Стеклоантура»: за и против / А. С. Болдырев // Молодой исследователь Дона. – 2017. – № 5 (8). – С. 25–29.
23. **Волчек, А. Г.** Стеклоантуры, смотровые площадки / А. Г. Волчек // Современные направления в проектировании, строительстве, ремонте и содержании транспортных сооружений: материалы III Междунар. студенч. конф., Минск, 7–8 дек. 2018 г. – Минск : БНТУ, 2019. – С. 100–107.
24. **Сумченко, И. А.** Современная стеклоантура / И. А. Сумченко // Интеллектуальный потенциал XXI века: ступени познания. – 2015. – № 27. – С. 8–12.
25. Противовес лифта: а. с. SU 929527 / Н. Е. Гарцбейн, А. А. Павлинкович. – Опубл. 23.05.1982.
26. **Байер, В. Е.** Архитектурное материаловедение: учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению 630100 «Архитектура» / В. Е. Байер. – Москва : Архитектура-С, 2005. – 261 с.
27. **Вовк, С. Г.** Светопрозрачный бетон как перспективный материал в строительстве / С. Г. Вовк, А. И. Морева // European Scientific Conference: сб. ст. IX Междунар. науч.-практ. конф., Пенза, 7 марта 2018 г.: в 2 ч. – Пенза: Наука и Просвещение, 2018. – С. 46–49.
28. **Коломоец, Г. М.** Производство бетона в России. Прозрачный бетон / Г. М. Коломоец // Современные перспективы строительства : сб. науч. ст. по материалам Молодежной науч. школы. – Калининград: Балтийский федер. ун-т имени Иммануила Канта, 2023. – С. 164–169.

Статья сдана в редакцию 9 августа 2023 года

Контакты:

bn_ntc@liftmach.by (Куцепенко Александр Владимирович);
onir@liftmach.by (Подымако Максим Эдуардович);
bn_ntc@liftmach.by (Заяц Елизавета Николаевна).

A. V. KUTSEPOLENKO, M. E. PODYMAKO, E. N. ZAYATS

MODERN TRENDS IN PANORAMIC ELEVATOR DESIGN

Abstract

The article deals with the development of industrial design, in particular in the field of panoramic elevator design and elevator equipment located inside a transparent shaft. There is a tendency to maximize the degree of glazing of panoramic elevators (up to 360°). It was determined that one of the main «irritants» in the glass shaft is the counterweight of the elevator car. Ways to reduce its negative impact on the appearance of panoramic elevators were analyzed. The concept of a transparent counterweight was put forward, which is most appropriate for the construction of panoramic elevators (presented at the «Russian Elevator Week 2023» International Exhibition of Elevators and Elevator Equipment in Moscow). This concept was generalized and the usage of counterweights with light-transmitting weight elements is proposed, which makes it possible to increase the aesthetic appeal of already existing counterweights with concrete weights through the use of Litracon transparent concrete.

Keywords:

industrial design, interior, exterior, glass architecture, panoramic elevator, transparent elevator shaft, transparent elevator car, elevator counterweight, glass industry, concrete weight elements, Litracon transparent concrete, light-transmitting material.

For citation:

Kutsepolenko, A. V. Modern trends in panoramic elevator design / A. V. Kutsepolenko, M. E. Podymako, E. N. Zayats // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 3 (80). – P. 35–47.

DOI: 10.53078/20778481_2023_3_48

УДК 621.7.01

М. Е. ЛУСТЕНКОВ, *д-р техн. наук, проф.*

В. М. ШЕМЕНКОВ, *канд. техн. наук, доц.*

К. В. САСКОВЕЦ

А. Н. МОЙСЕЕНКО

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЦЕНТРАЛЬНЫХ КОЛЕС ПЕРЕДАЧИ С ПЛОСКО-КОНИЧЕСКИМ ЗАЦЕПЛЕНИЕМ

Аннотация

Рассмотрены вопросы изготовления кулачков сферических роликовых передач. Передачи позволяют получать большие значения передаточных чисел при небольших габаритах и массе. В процессе работы передачи ролики, установленные в двух рядах сателлита, обкатываются по центральным колесам – кулачкам. Проанализированы различные способы формообразования рабочих поверхностей кулачков. Предложены зависимости, согласующие движения инструмента и заготовки для изготовления кулачков с помощью трехкоординатного станка с ЧПУ. Разработан метод согласования движений инструмента на основе преобразования декартовых координат в сферические для применения промышленного робота с фрезерным шпинделем.

Ключевые слова:

сферическая роликовая передача, плоско-коническое зацепление, кулачок, промышленный робот.

Для цитирования:

Технологии изготовления центральных колес передачи с плоско-коническим зацеплением / М. Е. Лустенков, В. М. Шеменков, К. В. Сасковец, А. Н. Моисеенко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 3 (80). – С. 48–56.

Введение и постановка задачи

Плоские зубчатые колеса применяются в механизмах дифференциалов, поворотных и тормозных устройств. Наиболее производительный и точный метод их изготовления – метод обкатки. Разработаны технологии изготовления зубьев плоских колес с помощью червячных фрез, а также накаткой [1]. Помимо традиционных зубчатых механизмов, разработаны передачи сферического типа, в которых сателлит, установленный на наклоненной втулке ведущего вала, совершает сферическое движение [2], а его зубчатый венец обкатывается по зубьям плоского или конического колеса. В этом случае профилирование зубьев производится с помощью специальных станочных приспособлений [3]. Зубчатые колеса с торцовыми зубьями являются основными элемен-

тами плоско-конического зацепления сферической роликовой передачи (СРП) с двухрядным сателлитом [4]. Они имеют сложный пространственный, циклически повторяемый профиль поверхностей зубьев, контактирующий с телами качения цилиндрической формы. В [5] рассмотрена технология изготовления кулачковых выступов (зубьев) методом копирования на универсальном оборудовании. Однако в связи с тем, что у центральных колес СРП изменяются высота зубьев по длине и профиль в различных концентрических сечениях, предложенный способ не применим. Целями исследований, таким образом, являлись анализ возможных технологий изготовления и разработка методов изготовления зубьев центральных колес плоско-конического зацепления.

Конструкция СРП и принцип ее работы

Для макета СРП (рис. 1, а), поясняющего конструкцию и принцип работы передачи, зубчатые колеса и сателлит были изготовлены методом послойного спекания металлического порошка

с помощью 3D-принтера. При этом цилиндрические выступы на сателлите имитируют ролики, которые имеют возможность вращаться относительно своих осей в промышленных конструкциях СРП. Принцип работы зацепления формообразования зубьев поясняется с помощью схемы на рис. 1, б.

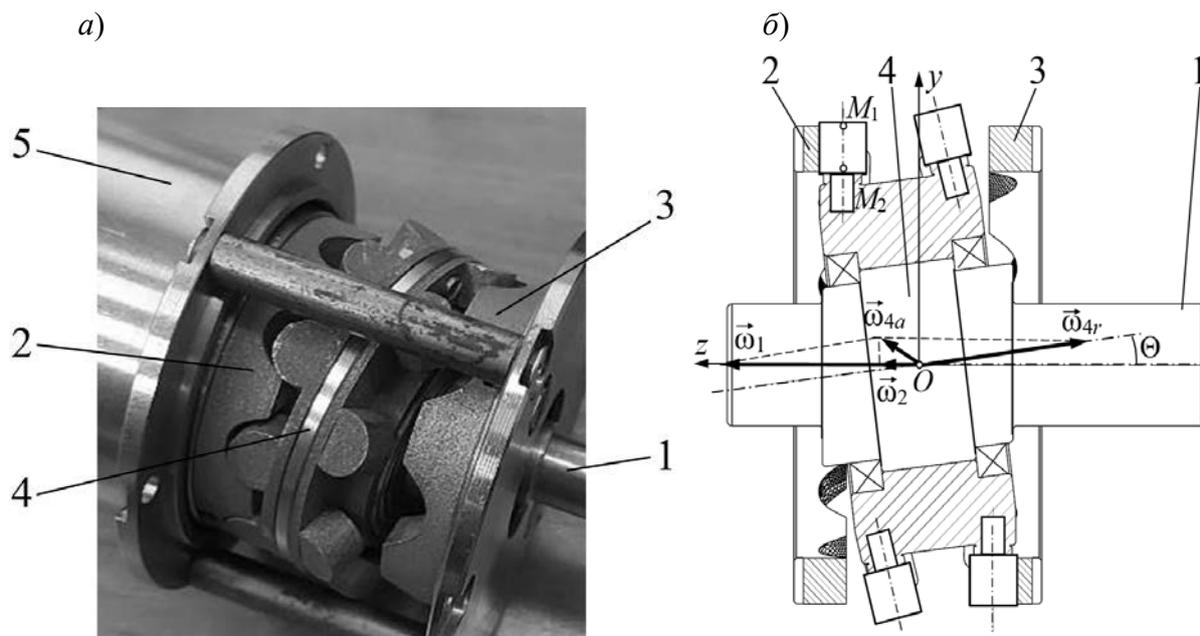


Рис. 1. Сферическая роликовая передача: а – макет; б – конструктивная схема; 1 – ведущий вал; 2 – ведомое центральное колесо; 3 – остановленное центральное колесо; 4 – сателлит с двумя рядами цилиндрических зубьев; 5 – корпус

Рассматриваем сферическое движение сателлита как сложное, состоящее из двух вращений. Ведущий вал вращается с угловой скоростью ω_1 . Это движение для сателлита можно рассматривать как переносное. Сателлит, установленный на наклоненном участке ведущего вала, вращается относительно своей оси (и оси наклоненного участка) с угловой скоростью ω_{4r} . Данное движение будет относительным. Сферическое движение сателлита можно рассматривать как мгновенно вращательное относительно мгновенной оси, меняющей положение в пространстве. Такое движение будет являться абсолютным с угловой скоростью ω_{4a} . Проекция

вектора этой скорости на ось Oz равна угловой скорости ω_2 ведомого центрального колеса и ведомого вала, соответственно, на котором оно закреплено. При постоянной скорости ведущего вала все другие скорости будут также постоянны.

Анализ возможных технологий изготовления плоских колес

При единичном и мелкосерийном производстве экономически оправданной будет являться разработка специального приспособления, закрепляемого на столе фрезерного станка. Приспособление должно иметь отдельный привод,

который обеспечивает сферическое движение заготовки, согласованное с движением подачи инструмента – цилиндрической фрезы. В конструкцию привода должен входить копир либо эксцентрик. При этом возможно изготовление колес на станке с трехкоординатной обработкой, однако возникает вопрос о точности перемещений, обеспечиваемых приспособлением.

Одним из вариантов изготовления колес методом копирования является

применение конических фрез. Данный метод предполагает профилирование инструмента для каждого колеса, что при небольших объемах выпуска и многовариантности проектируемых редукторов не целесообразно.

Универсальным способом является получение колес с применением аддитивных технологий. Данный вариант был реализован с помощью порошкового 3D-принтера по разработанной модели в системе NX (рис. 2, а).

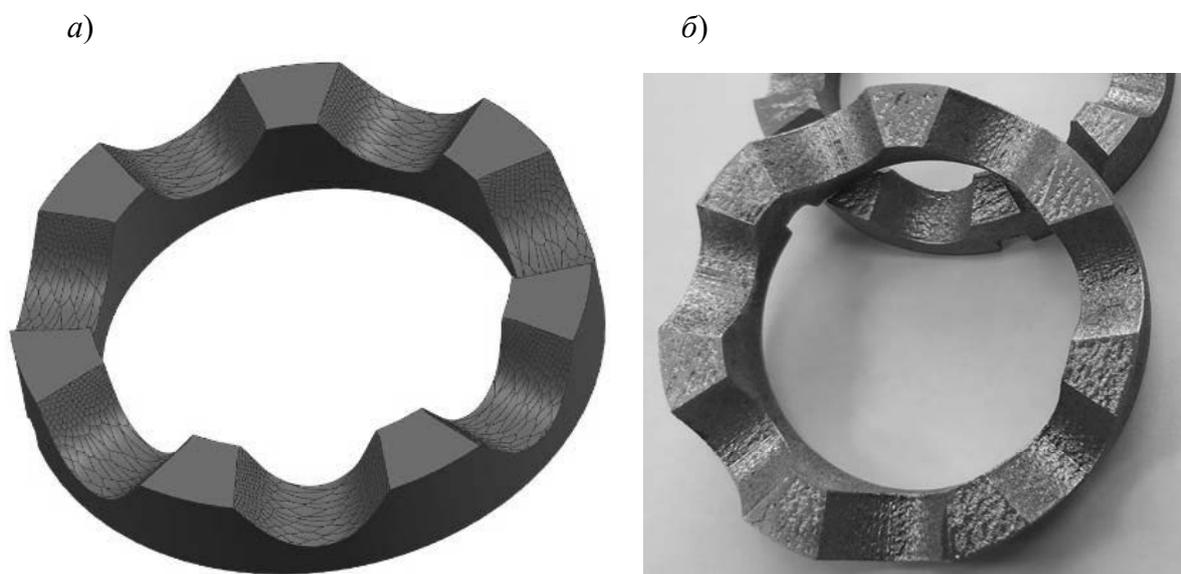


Рис. 2. Центральное колесо СРП: а – модель, разработанная в NX; б – изготовленные образцы колес

Зубчатые колеса были изготовлены согласно разработанным в NX моделям с помощью порошкового 3D-принтера Shining Pro 250S производства KHP (рис. 2, б). Материал колес – нержавеющая сталь 316L (российский аналог – сталь 03X17H14M3), твердость поверхностей после спекания – 170...190 НВ. Недостатки метода: пониженная точность, вызванная в том числе усадкой материала при остывании; низкая контактная прочность зубьев колеса. В связи со стремительным развитием аддитивных технологий данные недостатки могут быть устранены в перспективе, но в настоящее время повышение качества обработки связано с необходимостью

применения дорогостоящего оборудования и материалов, что не всегда оправдано.

При применении металлообрабатывающего оборудования следует отдельно рассматривать изготовление профиля зубьев сферической фрезой с радиусом рабочей поверхности, не превышающим минимальные радиусы обрабатываемых поверхностей. Центр фрезы в процессе обработки перемещается по замкнутым траекториям, смещаясь от прохода к проходу в радиальном направлении. При данном методе обработки можно использовать фрезерные центры с ЧПУ с тремя координатами (x , y , z) для перемещения инструмента и заготовки

(центр ТМ1 НААС в Белорусско-Российском университете).

Данный способ поясняется с помощью рис. 3. При этом цилиндрическая заготовка закрепляется с вертикально

расположенной осью Oz . Обработка проводится сферической фрезой с радиусом r_s , центр которой перемещается по траекториям, показанным на рис. 3, а.

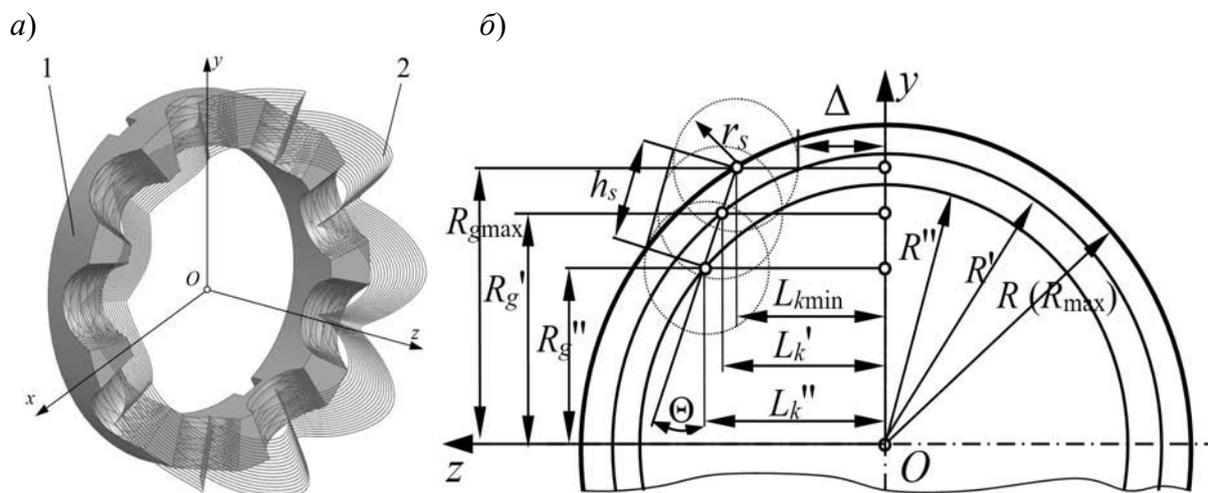


Рис. 3. К пояснению способа изготовления зубьев сферической фрезой: а – общая схема обработки; б – геометрические параметры траекторий; 1 – колесо; 2 – траектории движения центра масс сферической фрезы

Эти траектории описываются параметрическими уравнениями

$$x(\varphi) = \sin((Z+1) \cdot \varphi) \cdot (L_k \cdot \sin(\Theta) + R_n \cdot \sin(Z \cdot \varphi) \cdot \cos(\Theta)) + R_n \cdot \cos(Z \cdot \varphi) \cdot \cos((Z+1) \cdot \varphi); \quad (1)$$

$$y(\varphi) = R_n \cdot \cos(Z \cdot \varphi) \cdot \sin((Z+1) \cdot \varphi) - (\cos((Z+1) \cdot \varphi)) \cdot (L_k \cdot \sin(\Theta) + R_n \cdot \sin(Z \cdot \varphi) \cdot \cos(\Theta)); \quad (2)$$

$$z(\varphi) = L_k \cdot \cos(\Theta) - R_n \cdot \sin(Z \cdot \varphi) \cdot \sin(\Theta), \quad (3)$$

где φ – центральный угол (параметр), отсчитываемый от плоскости xOy , изменяемый от нуля до $2 \cdot \pi$ рад; Z – число зубьев; Θ – угол наклона оси сателлита к оси передачи; L_k , R_n – геометрические параметры.

Для построения ряда кривых вычислялось значение $R_{g \max} = \sqrt{R^2 - L_{k \min}^2}$. Далее, для каждой кривой с установ-

ленным шагом изменялся параметр R_g от $R_{g \max}$ до $R_{g \min} = R_g''$. Этот параметр зависит от высоты ролика h_s , контактирующего с зубьями. На рис. 3, б его величина равна отрезку на оси ролика M_1M_2 . Пересчитывались значения L_k и R_n по формулам

$$L_k = (R_{g \max} - R_g) \cdot \operatorname{tg}(\Theta) + L_{k \min};$$

$$R_n = \sqrt{R^2 - L_k^2}. \quad (4)$$

Геометрические параметры, приведенные в уравнениях (1)–(3), показаны на рис. 3, б. Центр системы координат O совпадает с расположением центра сферического движения сателлита относительно центрального колеса. Траектории движения центра фрезы располагаются на сферах с радиусами R_{ni} , которые изменяются от R до R'' .

Недостатками метода являются малая производительность и волнистость поверхности, обусловленная величиной перемещения в радиальном направлении, на которое смещается фреза при завершении очередного прохода.

Более перспективной является обработка поверхностей цилиндрическими фрезами, имитирующими роликовое зацепление СРП. Диаметр фрезы при этом равен диаметру роликов. Для реализации данного метода при неподвижной заготовке необходимы станки с ЧПУ с четырех- и более координат-

ной обработкой, например токарно-фрезерные обрабатывающие центры с наклонно-поворотными столами или (и) со шпинделями, имеющими возможность наклона (поворота). Такое оборудование имеет высокую стоимость и не всегда в наличии на машиностроительных предприятиях.

Рассмотрим схему движений инструмента (цилиндрической фрезы) при формообразовании профиля зубьев (рис. 4), при которой фреза согласуется с движением заготовки.

Начало координат привязывается к поверхности заготовки, которая поворачивается относительно собственной оси на угол φ_1 . Ось инструмента 2, в первоначальный момент параллельная оси Oy , совершает плоское движение в плоскости yOz , состоящее из двух согласованных движений: перемещения вдоль оси Oy по закону $y'(\varphi_1)$ и поворота в плоскости xOz на угол $\alpha(\varphi_1)$. При этом ось инструмента все время остается касательной к сфере с радиусом R_{ins} (рис. 5).

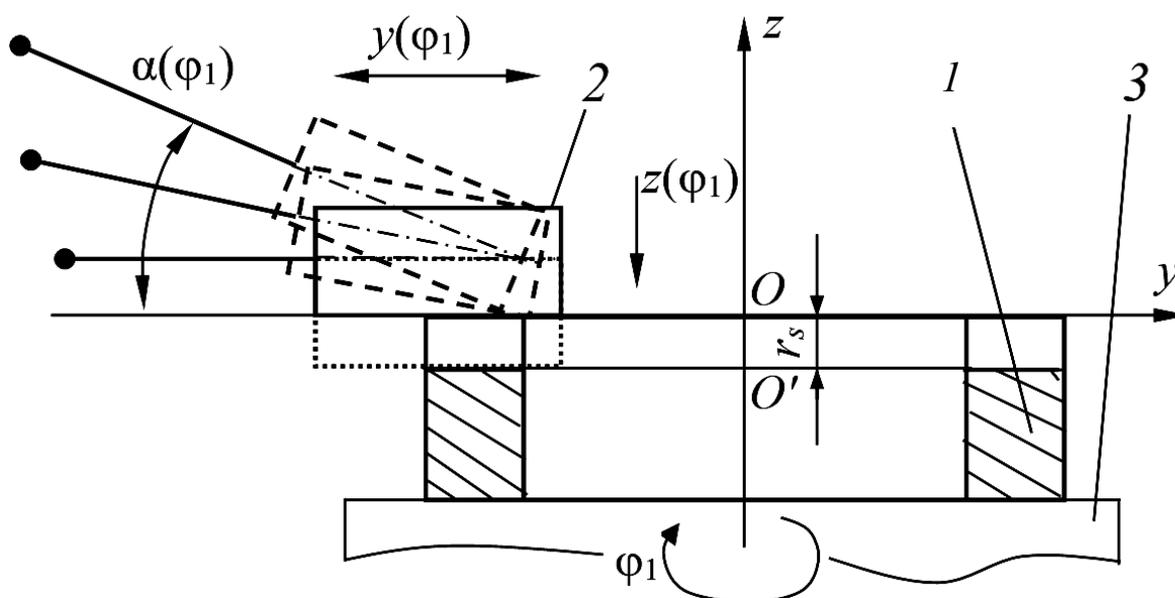


Рис. 4. Схема согласования движений инструмента и заготовки при изготовлении кулачкового профиля: 1 – заготовка; 2 – фреза; 3 – стол

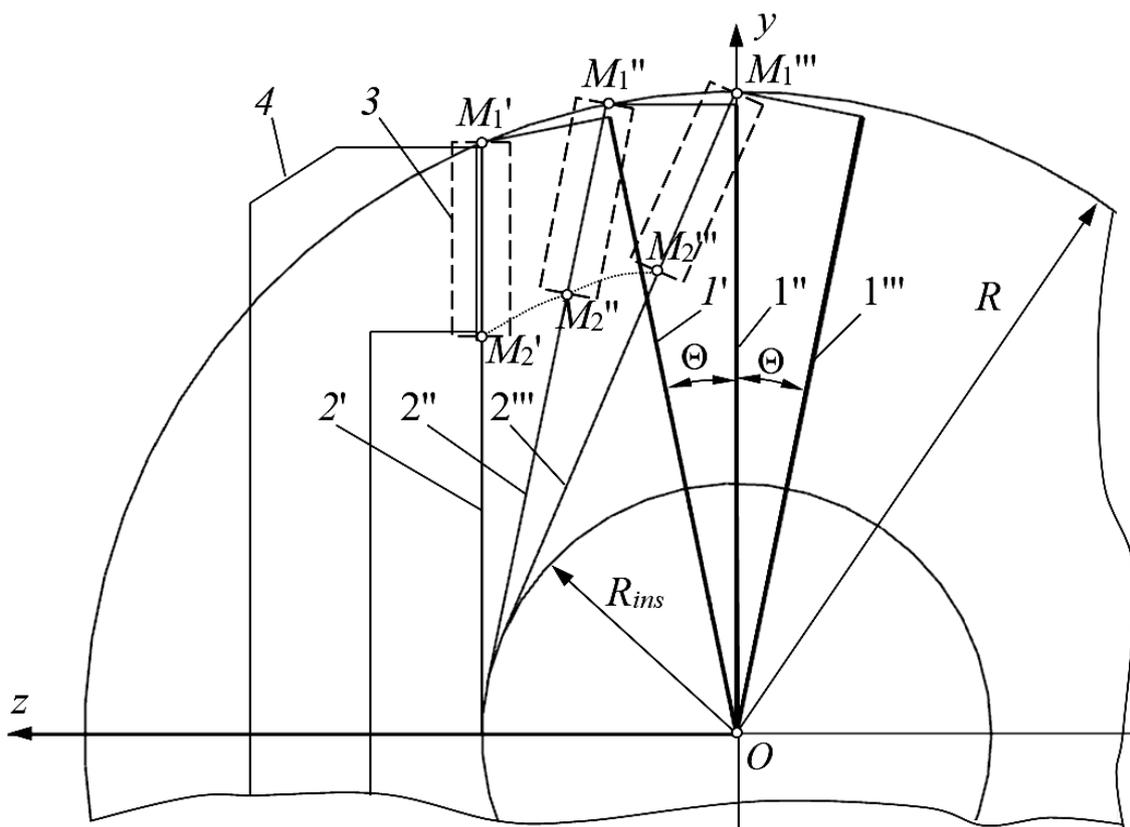


Рис. 5. Движение инструмента при изготовлении зубчатого профиля: 1 – сателлит; 2 – ось ролика; 3 – профиль инструмента; 4 – заготовка

Для разработки управляющей программы для станка с ЧПУ были получены следующие зависимости угла поворота фрезы от угла поворота заготовки:

$$\alpha(\varphi_1) = \Theta - \arcsin\left(\frac{z(\varphi_1)}{R}\right); \quad (5)$$

$$y'(\varphi) = y(\varphi) - R \cdot \sin(\varphi). \quad (6)$$

Координата $y(\varphi)$ в уравнении (6) вычисляется согласно выражению (2). Координата $z(\varphi_1)$ определяется как

$$z(\varphi_1) = R_n \cdot \cos(Z \cdot \varphi_1) \cdot \sin(\Theta). \quad (7)$$

Для центральной кривой с параметрами $R = 50$ мм, $L_k = 10$ мм, $Z = 9$, $\Theta = 6/R = 0,12$ рад радиус касательной сферы составил $R_{ins} = 15$ мм.

Основы формообразования зубьев с помощью промышленного робота

Было определено, что наиболее оптимальным вариантом изготовления профиля зубьев будет применение промышленного робота FANUC AM1001C/7L с установленным шпинделем для фрезерной обработки. Робот оборудован поворотным столом, следовательно, для удобства расчета траектории движения нужно перейти от декартовой системы координат к сферической.

Для описания траектории движения фрезы необходимо определить $r(\varphi)$ – радиус-вектор, $\theta(\varphi)$ – полярный (зенитный) угол и $\psi(\varphi)$ – азимутный угол для образующей между двумя крайними кривыми, представленными на рис. 6. Для этого нужно было перевести уравнения (1)–(3) в сферические координаты.

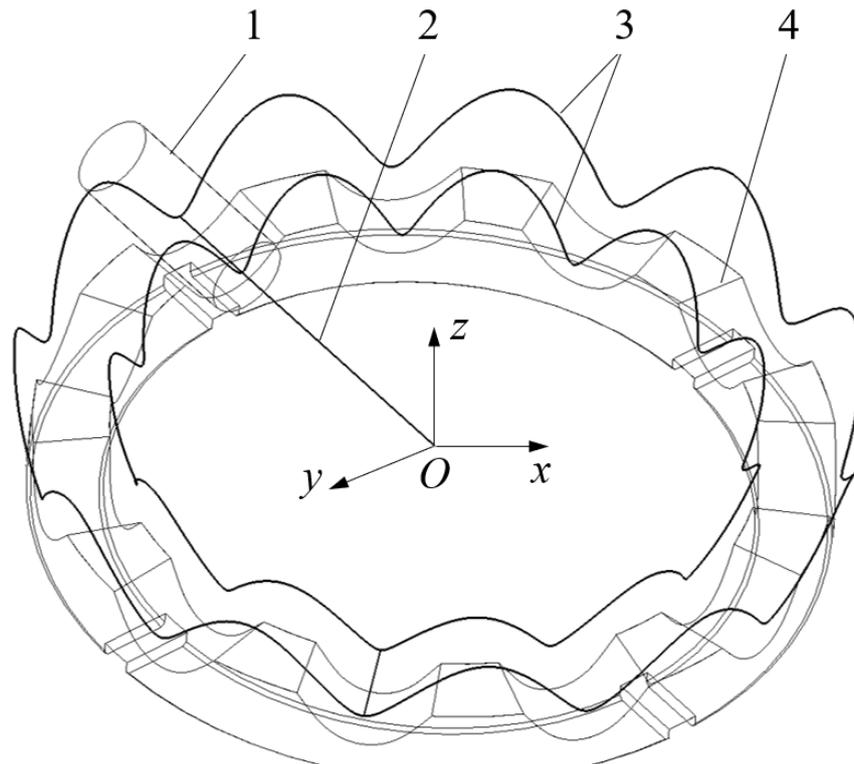


Рис. 6. Траектории движения точек оси цилиндрической фрезы: 1 – инструмент (цилиндрическая фреза); 2 – ось инструмента; 3 – траектории крайних точек осей; 4 – зубчатый профиль

Для перевода уравнений в сферические координаты были использованы следующие связи:

$$x(\varphi) = r(\varphi) \cdot \sin(\theta(\varphi)) \cdot \cos(\psi(\varphi)); \quad (8)$$

$$y(\varphi) = r(\varphi) \cdot \sin(\theta(\varphi)) \cdot \sin(\psi(\varphi)); \quad (9)$$

$$z(\varphi) = r(\varphi) \cdot \cos(\theta(\varphi)), \quad (10)$$

где $r(\varphi)$ – радиус-вектор, соединяющий начало отсчета с исследуемой точкой; $\theta(\varphi)$ – полярный угол; $\psi(\varphi)$ – азимутный угол.

Полярный и азимутный углы определялись по выражениям [6]

$$r(\varphi) = \sqrt{(x(\varphi)^2 + y(\varphi)^2 + z(\varphi)^2)}; \quad (11)$$

$$\theta(\varphi) = \arccos(z(\varphi)/r(\varphi)); \quad (12)$$

$$\varphi(\varphi) = \arctg(y(\varphi)/x(\varphi)). \quad (13)$$

После подстановки значений $x(\varphi)$, $y(\varphi)$, $z(\varphi)$ из заданных уравнений (1)–(3) в данные уравнения связей (11)–(13) были получены выражения в сферических координатах. Эти уравнения описывают кривую в сферических координатах, используя заданные координаты $x(\varphi)$, $y(\varphi)$, $z(\varphi)$ и параметры L_k , R_n , Z и Θ .

Расчет $r_1(\varphi)$, $\theta_1(\varphi)$, $\psi_1(\varphi)$ и $r_2(\varphi)$, $\theta_2(\varphi)$, $\psi_2(\varphi)$ с соответствующими параметрами L_{k1} , R_{n1} и L_{k2} , R_{n2} позволил установить, что полярный угол $\theta_1(\varphi) = \theta_2(\varphi)$. Зная две стороны треугольника, образованного между векторами $r_1(\varphi)$ и $r(\varphi)$, а также угол между ними, равный $\theta_1(\varphi) - \theta_2(\varphi)$, из теоремы косинусов было получено выражение для определения длины отрезка C (рис. 7). В данном случае отрезок C является образующей поверхности, расположенной между двумя тра-

екториями, следовательно, он определяет вектор, вдоль которого направле-

на ось инструмента.

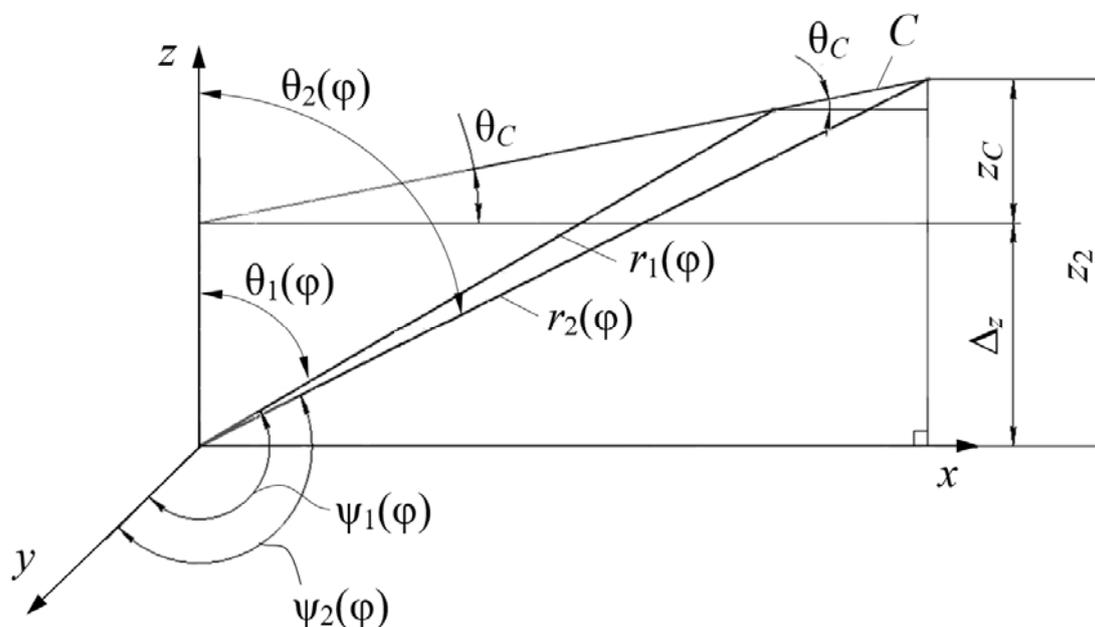


Рис. 7. Расчет параметров образующей

Длина образующей

$$C = \sqrt{r_2(\varphi)^2 + r_1(\varphi)^2 - 2 \cdot r_2(\varphi) \cdot r_1(\varphi) \cdot \cos(\theta_1(\varphi) - \theta_2(\varphi))}. \quad (14)$$

Тогда угол θ_c (угол наклона вектора C)

$$\theta_c = \theta_2(\varphi) + (r_2(\varphi) + C - r_1(\varphi)) / 2 \cdot r_1(\varphi) \cdot C. \quad (15)$$

Смещение вектора C по оси Oz

$$\Delta_z = \sin(\theta_2(\varphi)) \cdot r_2(\varphi) - \cos(\theta_c) \cdot \cos(\theta_2(\varphi)) \cdot r_2(\varphi). \quad (16)$$

Таким образом, имея угол θ_c (угол наклона фрезы при обработке) и коэффициент смещения Δ_z (смещение оси фрезы по оси Oz), а также зная угол $\psi_1(\varphi)$, являющийся углом поворота стола, можно осуществить обработку зубчатого колеса с использованием промышленного робота со шпинделем для фрезерной обработки. Применяя данный метод, можно производить

шлифование зубьев, установив в шпиндель робота шлифовальную насадку.

Выводы

Аддитивные технологии изготовления зубчатых колес со сложным пространственным профилем для сферических роликовых передач в настоящее время не являются рациональными для

применения с учетом единичного (мелкосерийного) производства, низкой производительности процесса и высокой стоимости порошка для спекания. Проведенный анализ различных технологий изготовления плоских колес показал, что наиболее предпочтителен способ обработки с помощью цилиндрических фрез на станках с ЧПУ. Перспективным явля-

ется также метод фрезерования зуба с использованием промышленного робота. При этом он достаточно трудоемкий, т. к. робот не может снимать большие припуски. Поэтому съем основной части металла целесообразнее производить на трехосевом обрабатывающем центре, а заключительный этап в виде шлифовки – на промышленном роботе.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маргулис, М. В. Разработка новой прогрессивной технологии получения зубьев плоских колес / М. В. Маргулис, Е. Е. Костенко // Вестн. Приазов. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 2, вып. 30. – С. 27–31.
2. Бостан, И. А. Планетарные прецессионные передачи с многопарным зацеплением / И. А. Бостан. – Кишинев: Штиинца, 1991. – 356 с.
3. Технологические аспекты создания рабочих поверхностей передач новых типов: монография / П. Н. Громько [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2012. – 209 с.: ил.
4. Lustenkov, M. E. Analysis of contact strength of spherical roller transmission with double-row pinion / M. E. Lustenkov, A. N. Moiseenko // IOP Conf. Series: International Conference on Mechanical Engineering and Modern Technologies (MEMT 2020). – 2021. – Vol. 1118 (2021) 012006. – 6 p.
5. Лустенков, М. Е. Расчет геометрии адаптированного профиля эллипсной шариковой передачи / М. Е. Лустенков // Технология машиностроения. – 2005. – № 5. – С. 36–38.
6. Воднев, В. Т. Основные математические формулы / В. Т. Воднев, А. Ф. Наумович, В. Ф. Наумович; под ред. В. А. Богданова. – Минск: Вышэйшая школа, 1988. – 269 с.: ил.

Статья сдана в редакцию 16 июля 2023 года

Контакты:

lustenkov@yandex.ru (Лустенков Михаил Евгеньевич);
vshemenkov@yandex.by (Шеменков Владимир Михайлович);
5808941@gmail.com (Сасковец Константин Валерьевич);
a_an1974@mail.ru (Моисеенко Андрей Николаевич).

M. E. LUSTENKOV, V. M. SHEMENKOV, K. V. SASKOVETS, A. N. MOISEENKO

TECHNOLOGIES FOR MANUFACTURING CENTRAL GEARS OF TRANSMISSIONS WITH FLAT BEVEL GEARING

Abstract

The article deals with manufacturing cams of spherical roller transmissions. These transmissions allow getting high gear ratios with small dimensions and mass. Various methods for machining working surfaces of the cams have been analyzed. Dependencies are proposed that coordinate the movements of the tool and workpiece to manufacture cams using a three-coordinate CNC machine. A method has been developed for coordinating tool movements based on the transformation of Cartesian coordinates into spherical ones when using an industrial robot with a milling spindle.

Keywords:

spherical roller transmission, flat bevel gearing, cam, industrial robot.

For citation:

Technologies for manufacturing central gears of transmissions with flat bevel gearing / M. E. Lustenkov, V. M. Shemenkov, K. V. Saskovets, A. N. Moiseenko // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 3 (80). – P. 48–56.

DOI: 10.53078/20778481_2023_3_57

УДК 621.83.06

Е. С. ЛУСТЕНКОВА

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВ ПОДЪЕМА БЕГОВЫХ ДОРОЖЕК СФЕРИЧЕСКИХ РОЛИКОВЫХ ПЕРЕДАЧ

Аннотация

Определяются углы подъема беговых дорожек как одни из основных геометрических параметров сферической роликовой передачи, от которых зависят ее эксплуатационные характеристики. Исследуемая передача содержит сателлит, который совершает сферическое движение. На сателлите коаксиально установлены два ряда роликов, взаимодействующих с пространственными периодическими беговыми дорожками, расположенными на сферических поверхностях, образованными кулачками, соединенными с корпусом и ведомым валом. Углы подъема беговых дорожек циклически изменяются при перемещении ролика по этим дорожкам. Приведены различные алгоритмы определения углов подъема и их сравнительный анализ. Проведена оценка применимости различных зависимостей для определения средних значений углов подъема беговых дорожек.

Ключевые слова:

прецессионная передача, нутационный привод, сферический механизм, роликовая передача, угол подъема кривой, редуктор.

Для цитирования:

Лустенкова, Е. С. Определение углов подъема беговых дорожек сферических роликовых передач / Е. С. Лустенкова // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 3 (80). – С. 57–65.

Введение

К современной редукторной технике предъявляются требования улучшения эксплуатационных характеристик при снижении материалоемкости для обеспечения конкурентоспособности и импортозамещения [1]. Применение передач с промежуточными телами качения (ППТК) позволяет увеличить передаваемый момент при небольших габаритах и массе привода по сравнению с известными передачами других типов при сопоставимых массогабаритных параметрах [2]. В ППТК сферического типа (прецессионных, нутационных) повышается уравновешенность системы и снижаются пусковые моменты [3, 4]. В сферических роликовых передачах (СРП) [5] одними из основных геометрических параметров являются углы подъема беговых дорожек, по которым перемещаются тела качения. Они выполняют такую же функцию, как уг-

лы давления (дополняют их до 90°) в кулачковых механизмах и углы подъема винтовой линии в паре «винт – гайка», и определяют направления реакций в зацеплении и его КПД [6, 7]. При перемещении ролика по беговой дорожке угол ее подъема периодически изменяется по определенному закону, который зависит от параметрических уравнений, описывающих данную беговую дорожку. Для проведения силового анализа передачи и разработки инженерных методик расчета и проектирования СРП необходимо установить средние значения углов подъема. Выражения для их определения были получены для дорожек, расположенных на цилиндрических поверхностях втулок ППТК цилиндрического типа [8, 9]. Целью работы являлась оценка применимости этих выражений для передач сферического типа.

Конструкция СРП с коаксиальным расположением рядов роликов и принцип ее работы

Передача (рис. 1) содержит ведущий вал 1, имеющий наклоненный участок 6 (кривошип). Этот наклон может обеспечиваться установкой эксцентриковой втулки на ведущий вал.

На кривошипе с помощью подшипников качения размещается составная сателлит 5. Сателлит содержит коаксиально расположенные наружную и внутреннюю втулки с отверстиями, выполненными с постоянным угловым шагом. В эти отверстия установлены два ряда роликов 4' и 4'' соответственно,

оси которых лежат в одной плоскости. При работе передачи наружный ряд роликов 4' контактирует своими поверхностями сферической формы с замкнутой беговой дорожкой 3. Эта беговая дорожка образована двумя остановленными сферическими кулачками 9, закрепленными в корпусе 10. Внутренний ряд роликов 4'' контактирует своими сферическими поверхностями с беговой дорожкой 2 ведомого сферического кулачка 7, соединенного с ведомым валом 8 СРП. Центр масс сателлита совпадает с центром сферического движения O и расположен на оси передачи [10].

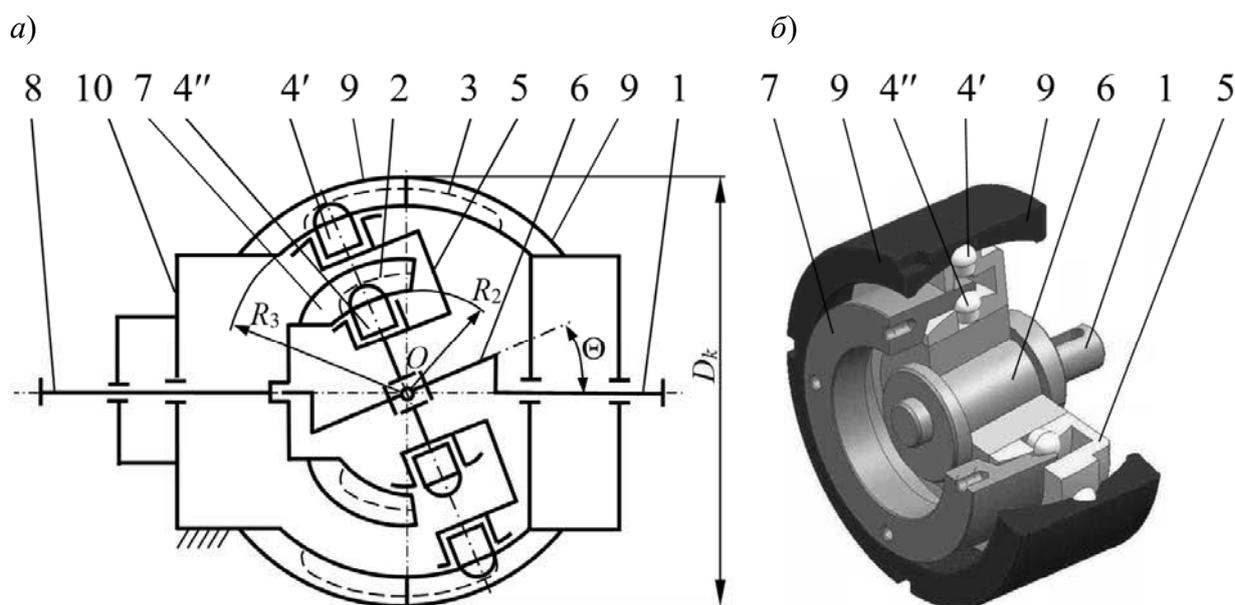


Рис. 1. СРП с двухрядным сателлитом: а – кинематическая схема; б – общий вид; 1 – ведущий вал; 2 – беговая дорожка ведомого кулачка; 3 – беговая дорожка, образованная остановленными кулачками; 4' и 4'' – наружный и внутренний ряды роликов; 5 – сателлит; 6 – кривошип; 7 – ведомый (внутренний) кулачок; 8 – ведомый вал; 9 – остановленные (наружные) кулачки; 10 – корпус

При передаче нагрузки ролики могут вращаться в отверстиях сателлита, перекатываясь своими сферическими торцами по беговым дорожкам. Этим обеспечивается снижение потерь мощности, потому что скольжение частично заменяется качением.

Доля тел качения, одновременно передающих нагрузку, в наружном ряду составляет 100 % от их общего числа и во внутреннем ряду – 50 %, что снижает удельные нагрузки в зацеплении на 50 %...150 % и повышает средний КПД в 2,5–3 раза.

Определение углов подъема беговых дорожек

В модели СРП беговые дорожки

$$x(\varphi) = R \cdot (\cos(Z \cdot \varphi) \cdot \cos((Z+1) \cdot \varphi) + \sin(Z \cdot \varphi) \cdot \sin((Z+1) \cdot \varphi) \cdot \cos(\Theta)); \quad (1)$$

$$y(\varphi) = R \cdot (\cos(Z \cdot \varphi) \cdot \sin((Z+1) \cdot \varphi) - \sin(Z \cdot \varphi) \cdot \cos((Z+1) \cdot \varphi) \cdot \cos(\Theta)); \quad (2)$$

$$z(\varphi) = -R \cdot \sin(Z \cdot \varphi) \cdot \sin(\Theta), \quad (3)$$

где R – радиус основной сферы, где полагаются траектории центров масс тел качения; Z – число периодов кривой; Θ – угол наклона кривошипа ведущего вала, который можно выразить через условную амплитуду A кривой, $\Theta = A/R$. Знак «минус» в уравнении (3) введен для удобства сравнения беговой дорожки с окружностью, на которой располагаются центры масс роликов, которая также размещена на сферической поверхности с радиусом R .

Замкнутые пространственные кривые, расположенные на сферической поверхности, можно назвать периодическими, поэтому число периодов Z – это число волн (число повторяющихся участков траектории центра масс тела качения, которые можно рассматривать как число полных колебаний этого центра относительно экваториальной плоскости спутника). Число периодов беговых дорожек, образованных кулачками, выполняет функцию чисел зубьев зубчатых колес в планетарной передаче с двухвенцовым спутником, если рассматривать эту передачу как аналог предлагаемой.

Для СРП с двухрядным спутником с коаксиальным расположением рядов роликов центровая кривая с параметрами $R = 30$ мм, $A = 5$ мм, $Z = 15$ показана на рис. 2. Рассмотрим некоторую точку M , расположенную на центровой кривой, и предположим, что эта точка перемещается по ней.

заменяются замкнутыми центровыми кривыми, расположенными на сферических поверхностях. Параметрические уравнения этих кривых [11]

Радиус-вектор, соединяющий ось Oz и точку M ,

$$R_{OM}(\varphi) = \sqrt{(x_M(\varphi))^2 + (y_M(\varphi))^2}, \quad (4)$$

где φ – центральный угол, отсчитываемый в экваториальной плоскости основной сферы (плоскости xOy).

Координаты точек окружностей, на которых лежат точки центровой кривой, образованных сечениями основной сферы плоскостями, перпендикулярных оси Oz ,

$$x_M(\varphi) = R_{OM}(\varphi) \cdot \cos(\varphi); \quad (5)$$

$$y_M(\varphi) = R_{OM}(\varphi) \cdot \sin(\varphi); \quad (6)$$

$$z_M(\varphi) = 0. \quad (7)$$

Вектор касательной к многопериодному центральному профилю в точке M определится как

$$\alpha_\tau(\varphi) = \begin{pmatrix} \frac{d}{d\varphi} x_M(\varphi) \\ \frac{d}{d\varphi} y_M(\varphi) \\ \frac{d}{d\varphi} z_M(\varphi) \end{pmatrix}. \quad (8)$$

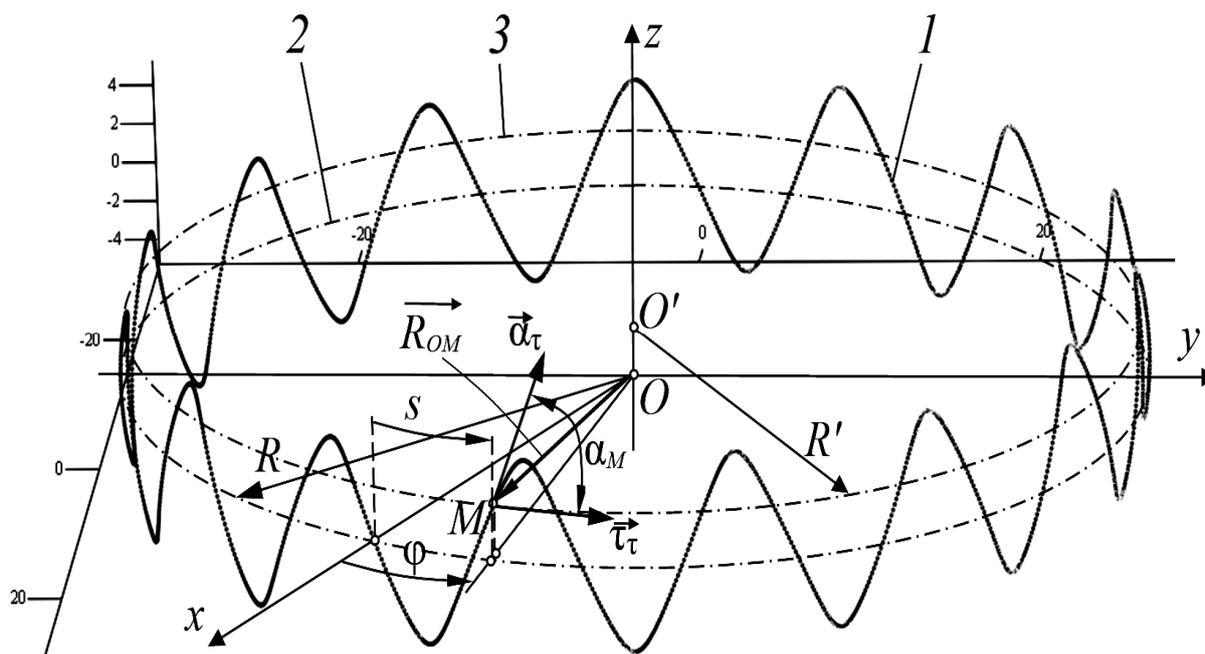


Рис. 2. К определению углов подъема беговых дорожек (центральных кривых) СРП: 1 – центровая кривая; 2 – средняя окружность; 3 – след сечения сферы плоскостью, перпендикулярной оси z в точке M

Вектор касательной к окружности с радиусом R'

$$\tau_{\tau M}(\varphi) = \begin{pmatrix} \frac{d}{d\varphi} x_M(\varphi) \\ \frac{d}{d\varphi} y_M(\varphi) \\ \frac{d}{d\varphi} z_M(\varphi) \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Абсолютное значение угла подъема многопериодной центральной кривой как функция центрального угла

$$|\alpha_M(\varphi)| = \arccos \left(\frac{\alpha_{\tau M}(\varphi) \cdot \tau_{\tau M}(\varphi)}{|\alpha_{\tau M}(\varphi)| \cdot |\tau_{\tau M}(\varphi)|} \right). \quad (10)$$

Алгоритм определения угла подъема по формулам (4)–(10) предполагает применение программного обеспечения для вычислений и не всегда удобен для автоматизации расчетов согласно комплексным методикам. Для инженерных расчетов необходимо оценить среднее

значение углов подъема.

Алгоритмы определения средних значений углов подъема

Угол подъема кривой также может быть определен для развертки пространственной кривой на плоскость. Уравнение развертки кривой на плоскость находится по формуле $z(s) = R \cdot \arcsin(z(s)/R)$, где s – дуговая координата, которая изменяется от нуля до $2 \cdot \pi \cdot R$ и отсчитывается вдоль окружности 2 (см. рис. 2) в экваториальном сечении, которую назовем средней линией. Для определения угла подъема кривой на развертке необходимо взять производную $dz(s)/ds$ и арктангенс от полученного выражения. После замены в выражении (3) центрального угла φ на дуговую координату, отнесенную к радиусу основной сферы s/R , и проведения преобразований имеем

$$\alpha_M = \arctg \left(\frac{Z \cdot \cos\left(\frac{Z \cdot s}{R}\right) \cdot \sin(\Theta)}{\sqrt{1 - \sin^2\left(\frac{Z \cdot s}{R}\right) \cdot \sin^2(\Theta)}} \right). \quad (11)$$

Аналогом СРП являются ППТК цилиндрического типа, у которых центровые кривые в модели передачи расположены на цилиндре с радиусом R . Угол подъема цилиндрической синусоиды с уравнением координаты траектории $z = -A \cdot \sin(Z \cdot s/R)$ будет определяться по формуле

$$\alpha_M = \arctg \left(-\frac{A \cdot Z}{R} \cdot \cos\left(\frac{Z \cdot s}{R}\right) \right). \quad (12)$$

Угол α_M периодически изменяется при его измерении вдоль средней линии как для цилиндрических (по уравнению (12)), так и для сферических (по уравнению (11)) передач. В модели СРП центры масс соседних роликов с равным угловым шагом отстоят друг от друга на центральной кривой и согласованно перемещаются по ней, поэтому угол подъема для каждого из центров масс, как и для точки M , периодически изменяется, соответственно, изменяется и направление нормальной реакции в контакте ролика и беговой дорожки. Как отмечено ранее, для проведения силового анализа цилиндрической передачи и определения рациональных параметров ее элементов также необходимо было установить среднее значение угла подъема. Для этого на плоской развертке синусоидальная кривая заменялась совокупностью отрезков прямых, соединенных у вершин, т. е. кусочно-винтовой кривой с постоянным по модулю углом подъема. Средний угол подъема для цилиндрической синусоиды в этом случае определялся как

$$\alpha_m = \arctg \left(\frac{2 \cdot Z \cdot A}{\pi \cdot R} \right). \quad (13)$$

Сделаем сравнительный анализ изменения абсолютных значений углов подъема, измеряемых вдоль средней линии, рассчитанных различными способами для сферической и цилиндрической кривых с сопоставимыми параметрами $R = 30$ мм, $Z = 15$, $A = 5$ мм, $\Theta = A/R = 0,167$ рад. Для получения графической зависимости I на рис. 3 в формулах (4)–(10) также использовалась замена центрального угла φ на дуговую координату, отнесенную к радиусу основной сферы: s/R .

Практическое совпадение графиков 2 и 3 свидетельствует о том, что выражение (11) для углов подъема на плоской развертке описывает зависимость, близкую к зависимости (12) для угла подъема на развертке цилиндрической синусоиды. Однако для цилиндрической синусоиды результаты, полученные по формулам (4)–(10) и формуле (11), идентичны. Для сферических передач зависимости угла подъема, определенного для пространственной кривой по формулам (4)–(10) и на развертке по формуле (11), различаются (графические зависимости 1 и 2). Еще больше эти различия проявляются при изменении параметров кривой до недопустимых значений. Если увеличить амплитуду в 2 раза ($A = 10$ мм) при сохранении других параметров, получим кривую с заострениями вершин (рис. 4). Если продолжать увеличивать амплитуду, возникнет явление самопересечения профиля. На рис. 4 показана трансформация одной из вершин кривой при увеличении амплитуды до 15 мм.

Изменение мгновенных и средних углов подъема, рассчитанных различными способами, при измерении их вдоль средней линии в случае $A = 10$ мм, показано на рис. 5.

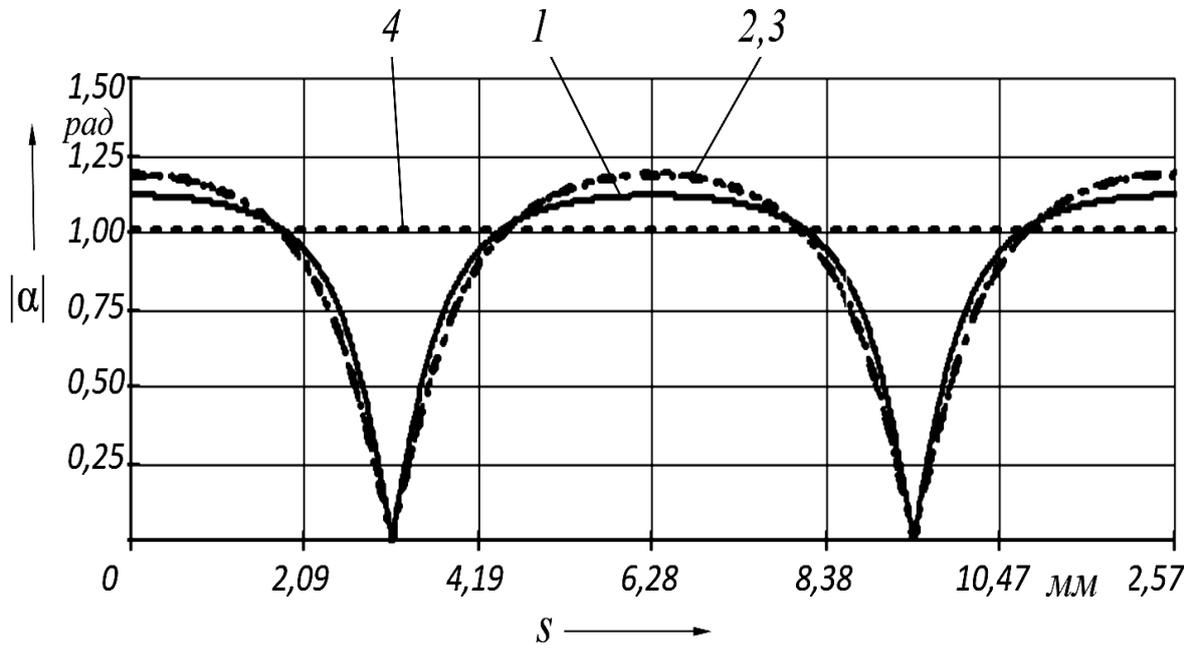


Рис. 3. Углы подъема: 1 – мгновенные значения для сферической кривой по формуле (10); 2 – мгновенные значения для сферической кривой по формуле (11); 3 – мгновенные значения для цилиндрической кривой по формуле (12); 4 – средние значения для цилиндрической кривой по формуле (13)

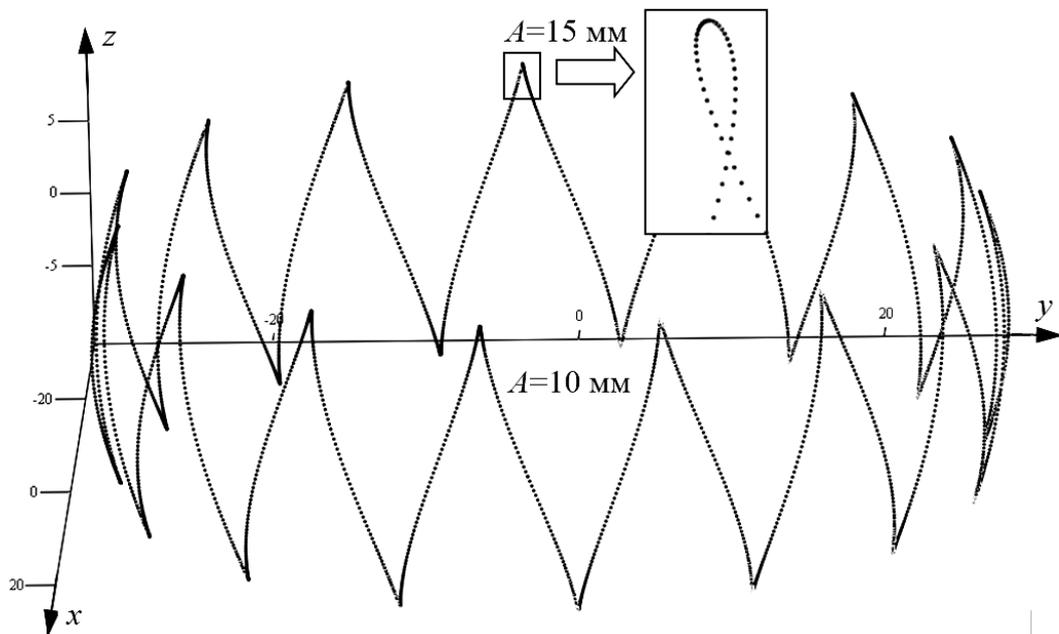


Рис. 4. Сферическая центровая кривая с параметрами $R = 30$ мм, $Z = 15$, $A = 10$ мм. Построение в программе Mathcad по 1800 точкам

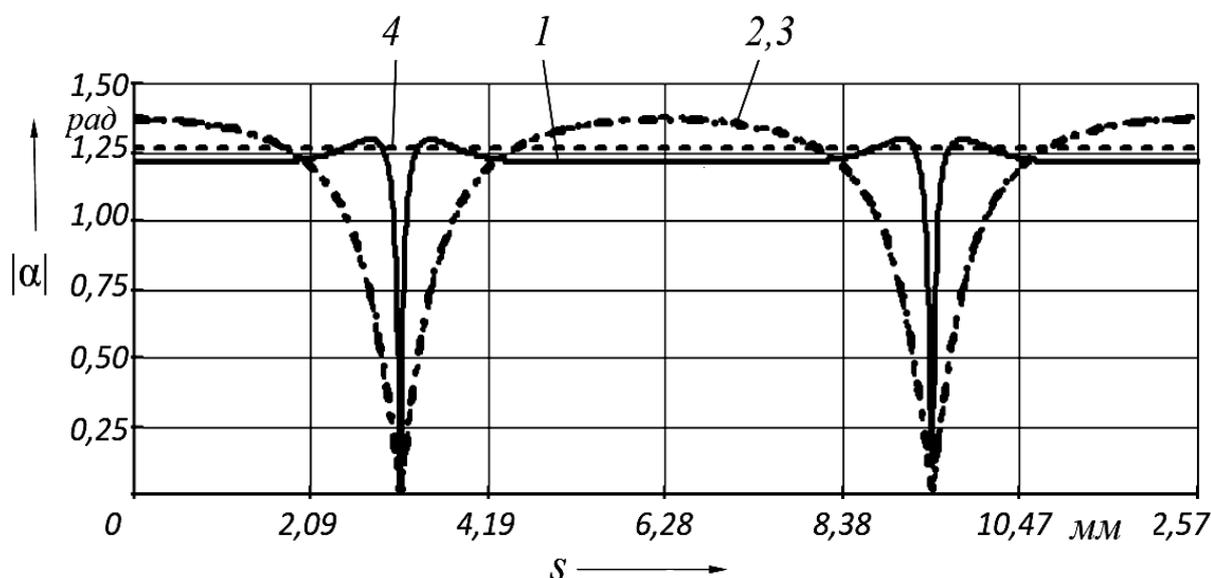


Рис. 5. Углы подъема: 1 – мгновенные значения для сферической кривой по формуле (10); 2 – мгновенные значения для сферической кривой по формуле (11); 3 – мгновенные значения для цилиндрической кривой по формуле (12); 4 – средние значения для цилиндрической кривой по формуле (13)

Как видно из рис. 5, только зависимость 1 показывает действительные значения угла подъема. Выражение (12) для плоской развертки может применяться для цилиндрических передач, но для сферических (формула (11)) сложные зависимости для координат x и y данное выражение не учитывает.

Оценим применимость выражения (13) для определения среднего угла подъема как цилиндрических, так и сферических передач.

Среднее значение функции $f(s)$ на

отрезке $[0; 2 \cdot \pi \cdot R]$ определяется согласно выражению

$$\alpha_{m0} = \frac{\int_0^{2 \cdot \pi \cdot R} f(s) ds}{2 \cdot \pi \cdot R}. \quad (14)$$

Рассмотрим варианты беговых дорожек передач с ранее принятыми параметрами и новыми. Результаты анализа приведены в табл. 1.

Табл. 1. Сравнение вариантов вычислений угла подъема

Тип передачи	Параметр			α_{m0} , рад	α_m , рад	Погрешность, %
	R , мм	Z	A , мм			
Цилиндрическая	30	15	5	0,916	1,010	10,262
Цилиндрическая	20	11	5	0,790	0,862	9,114
Цилиндрическая	30	15	10	1,152	1,266	9,896
Сферическая	30	15	5	0,916	1,010	10,262
Сферическая	20	11	5	0,786	0,862	9,669
Сферическая	30	15	10	1,214	1,266	4,283

Для указанных геометрических параметров погрешность составляет 4,3 %...10,3 %. Видно, что для сферических передач увеличение амплитуды приводит к снижению погрешности. При этом средние значения углов подъема возрастают. К увеличению углов подъема также приводит уменьшение радиуса R и чисел периодов Z при прочих равных параметрах.

Заключение

Проведена оценка возможности применения различных алгоритмов при вычислении средних значений углов подъема беговых дорожек сферических роликовых передач, расположенных симметрично экваториальной плоскости сателлита. При диаметрах основной сферы 20...30 мм и таких же значениях радиуса основания цилиндрических по-

верхностей использование формулы для определения среднего угла подъема беговых дорожек как кусочно-винтовых кривых для сферических и цилиндрических передач с промежуточными телами качения приводит к завышению реальных значений углов примерно на 10 %. При этом для сферических передач эта погрешность с увеличением углов подъема снижается. В целом, исследования подтвердили возможность использования формулы для определения углов подъема сферических кривых, как для цилиндрических кусочно-винтовых на плоской развертке, однако для компенсации погрешности в методиках расчета и проектирования сферических роликовых передач с двухрядным сателлитом с коаксиальным расположением рядов роликов необходимо умножать полученные значения на поправочный коэффициент.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зубчатые передачи и трансмиссии в Беларуси: проектирование, технология, оценка свойств: монография / В. Б. Альгин [и др.]; под общ. ред. В. Б. Альгина, В. Е. Старжинского. – Минск: Беларуская навука. 2017. – 407 с.
2. **Лустенков, М. Е.** Шариковые планетарные передачи для средств малой механизации / М. Е. Лустенков // Вестн. машиностроения. – 2004. – № 6. – С. 15–17.
3. Kinematic Modeling for the Nutation Drive Based on Screw Theory / J. Hong [et al.] // Procedia CIRP. – 2015. – № 36. – P. 123–128.
4. **Лустенков, М. Е.** Механизм с изменяющимся углом между осями валов / М. Е. Лустенков, Е. С. Фитцова // Вестн. Брянского гос. техн. ун-та. – 2014. – № 1. – С. 46–50.
5. **Лустенков, М. Е.** Теоретические и экспериментальные исследования сферических роликовых передач / М. Е. Лустенков, Е. С. Лустенкова // Вестн. Ижевского гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 23–27.
6. **Лустенков, М. Е.** Определение основных геометрических параметров планетарных шариковых передач / М. Е. Лустенков // Сборка в машиностроении и приборостроении. – 2008. – № 1. – С. 12–17.
7. **Лустенков, М. Е.** Определение КПД передач с составными промежуточными телами качения / М. Е. Лустенков // Изв. вузов. Машиностроение. – 2014. – № 6. – С. 13–19.
8. **Лустенков, М. Е.** Расчет геометрии адаптированного профиля эллипсной шариковой передачи / М. Е. Лустенков // Технология машиностроения. – 2005. – № 5. – С. 36–38.
9. **Lustenkova, M. E.** Strength calculations for cylindrical transmissions with compound intermediate rolling elements / M. E. Lustenkova // Int. J. of Mechanisms and Robotic Systems. – 2015. – Vol. 2, № 2. – P. 111–121.
10. **Lustenkova, M. E.** Load Capacity of Spherical Roller Transmission with Double-Row Pinion / M. E. Lustenkova, E. S. Lustenkova // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – 795 (2020) 012020. – 6 p.
11. **Лустенков, М. Е.** Расчет и проектирование сферических роликовых передач: монография / М. Е. Лустенков, Е. С. Лустенкова. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 177 с. : ил.

Статья сдана в редакцию 15 июня 2023 года

Контакты:

fittsova@gmail.com (Лустенкова Екатерина Сергеевна).

E. S. LUSTENKOVA

DETERMINATION OF ASCENT ANGLES OF RACE TRACKS IN SPHERICAL ROLLER TRANSMISSIONS

Abstract

The article determines ascent angles of race tracks in a spherical roller transmission as one of its main geometric parameters, on which the operational characteristics depend. The transmission under study contains a satellite that performs a spherical motion. Two rows of rollers are coaxially mounted on the satellite, and they interact with spatial periodic race tracks, which are located on spherical surfaces formed by the cams connected to the housing and the driven shaft. The ascent angles of the race tracks change cyclically as the roller moves along these race tracks. Various algorithms for determining the ascent angles and their comparative analysis are given. The applicability of various dependencies was assessed for determining average values of the ascent angles of the race tracks.

Keywords:

precession transmission, nutation drive, spherical mechanism, roller transmission, ascent angle of the curve, reducer.

For citation:

Lustenkova, E. S. Determination of ascent angles of race tracks in spherical roller transmissions / E. S. Lustenkova // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 3 (80). – P. 57–65.

DOI: 10.53078/20778481_2023_3_66

УДК 621.83.06

Е. С. ЛУСТЕНКОВА

С. А. ЗЫЛЬ

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИНУСОШАРИКОВОЙ ПЕРЕДАЧИ В СИСТЕМЕ SIEMENS NX

Аннотация

Рассмотрены вопросы компьютерного моделирования нового типа механических передач. Разработан алгоритм исследования параметров синусошариковой передачи в модулях кинематики и конечно-элементного анализа системы автоматизированного проектирования NX. Синусошариковые передачи нашли применение в технике для бурения скважин и механизированном инструменте. В настоящее время рассматривается возможность их применения для создания дифференциальных и мультипликаторных механизмов. В разработанной модели тела качения (шарики) перемещаются по беговым дорожкам, выполненным в виде замкнутых на цилиндрических поверхностях синусоидальных кривых одинаковой амплитуды. Беговые дорожки изготавливаются на цилиндрических поверхностях внутренней и наружной втулок. Между двумя втулками располагается сепаратор (водило), который имеет осевые пазы, вдоль которых перемещаются шарики, вынуждая его вращаться с редуцированной скоростью. Разработаны алгоритмы определения среднего значения КПД передачи на стадии проектирования. Исследованы деформации и напряжения, возникающие в сепараторе как наиболее слабом элементе механизма.

Ключевые слова:

синусошариковая передача, тела качения, редуктор, сепаратор, метод конечных элементов, КПД.

Для цитирования:

Лустенкова, Е. С. Моделирование работы синусошариковой передачи в системе Siemens NX / Е. С. Лустенкова, С. А. Зыль // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 3 (80). – С. 66–75.

Введение

Компьютерное моделирование и инженерный анализ с помощью современных систем автоматизированного проектирования позволяют существенно сократить расходы на подготовку производства новой техники и время выхода ее на рынок. Система Siemens NX включает необходимые модули для создания модели, ее виртуальных испытаний и изготовления (CAD, CAE и CAM) и используется в учебном процессе Белорусско-Российского университета (БРУ). Особенно эффективно применение NX при проектировании новой техники, для которой еще не разработано проверенных ресурсными испытаниями методик расчета. В БРУ на протяжении нескольких десятков лет

разрабатываются и исследуются новые типы элементов механических приводов – передачи с промежуточными телами качения (ППТК) [1]. Одна из таких передач – синусошариковая передача, преимуществами которой являются малые радиальные габариты и высокая нагрузочная способность благодаря параллельной многопоточности [2]. Синусошариковые передачи нашли применение в технике для бурения скважин и механизированном инструменте [3]. В настоящее время рассматривается возможность их применения для создания дифференциальных и мультипликаторных механизмов [4]. При проектировании новых технических объектов постоянно возникает необходимость решения задач поиска оптимальных решений по нескольким критериям, одним из ко-

торых является КПД [5–7]. Также актуальна задача обеспечения прочности основных элементов механизма [8–10]. Целью настоящих исследований являлась разработка алгоритмов исследования параметров синусошариковой передачи в модулях программы NX, предназначенных для инженерного анализа.

Параметры модели синусошариковой передачи

Компьютерная модель синусошариковой передачи, разработанная в NX, показана на рис. 1, а. Тела качения (шарики) 4 перемещаются по беговым дорожкам, выполненным в виде замкнутых цилиндрических синусоидальных кривых одинаковой амплитуды. Одна такая дорожка с числом периодов (волн) Z_1 выполнена на поверхности внутренней втулки 1, а другая с числом периодов Z_3 – на внутренней поверхности наружной втулки 3. Между двумя втулками размещается сепаратор (водило) 2, который имеет осевые пазы, рас-

положенные с постоянным угловым шагом. Шарики, перемещаясь по беговой дорожке внутренней втулки, которая является ведущим звеном, одновременно обкатываются по неподвижной беговой дорожке наружной втулки, соединенной с корпусом редуктора, а также перемещаются вдоль пазов сепаратора (ведомого звена), вынуждая его вращаться с редуцированной скоростью.

После процесса создания моделей основных элементов и их сборки в блоке программы Modelling дальнейшие исследования проводились в блоке Motion Simulation. Внутренней втулке с однопериодной синусоидальной беговой дорожкой (в форме эллипса) обеспечена возможность вращения относительно оси Oz с помощью установленного вращательного шарнира. Наружная втулка с многопериодной синусоидой остается неподвижной (наложен фиксирующий шарнир), а сепаратор также с помощью установленного вращательного шарнира имеет возможность вращаться относительно оси Oz .

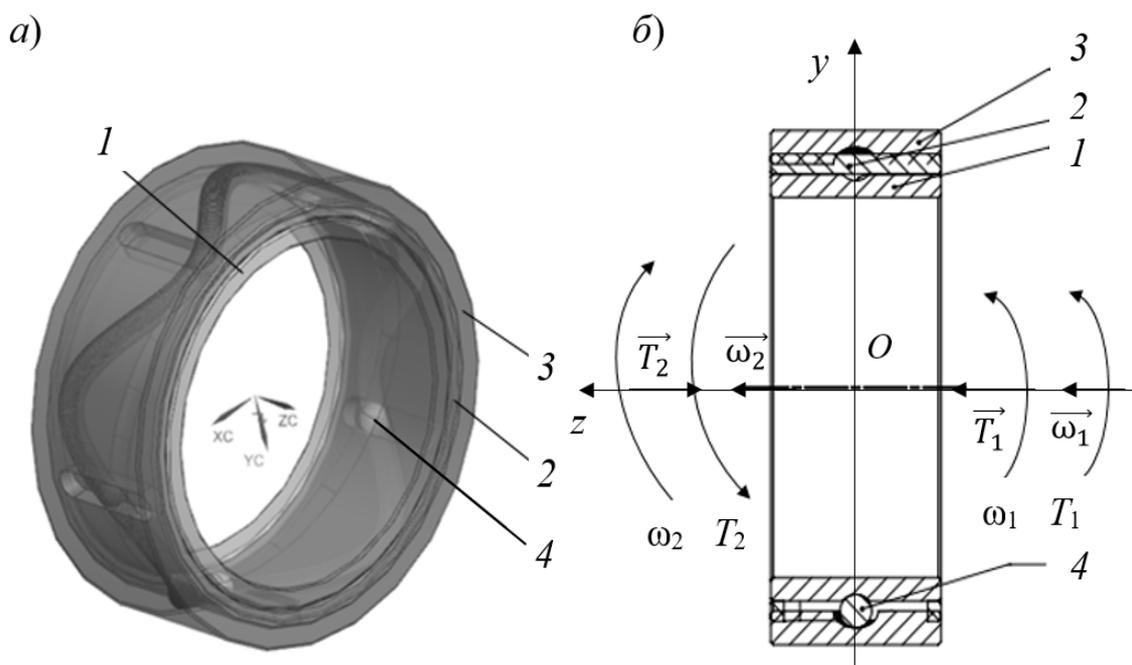


Рис. 1. Модель синусошариковой передачи в системе NX: а – общий вид; б – с обозначением нагрузок

Внутренней втулке с однопериодной беговой дорожкой задавалось постоянное вращение с угловой скоростью 2π рад/с с помощью активированного полиномиального драйвера в шарнире. К сепаратору прикладывался векторный момент, модуль которого $T_2 = 50$ Н·м. Вектор момента направлен вдоль оси вращения Oz в сторону, обратную вектору угловой скорости вращения (момент сопротивления). В 3D-контактах между телами качения и сепаратором со втулками устанавливался динамический коэффициент трения $f = 0,02$. Остальные параметры принимались предлагаемыми программой по умолчанию: экспоненциальный коэффициент усиления – 2; коэффициент демпфирования материала – 10 Н·с/мм; величина допустимого взаимопроникновения поверхностей – 0,01 мм.

Так как в задачи исследования входило определение КПД редукторного механизма, в качестве управляемого параметра была выбрана амплитуда A беговых дорожек. Ее значение в совокупности с радиусом R образующей окружности цилиндрической поверхности, где располагаются центры масс шариков, и числом периодов (волн) беговой дорожки Z определяют комплексный параметр – угол подъема беговой

дорожки. Данный угол, как и угол давления в кулачковых механизмах или угол подъема винтовой линии в червячных и винтовых механизмах, наряду с коэффициентами трения определяет КПД механизма.

Ранее была получена зависимость для определения оптимальной амплитуды беговой дорожки по критерию максимального КПД [11]

$$A = \frac{\pi \cdot R \cdot \sqrt{2 \cdot Z_3 - \operatorname{tg}^2(\psi)}}{4 \cdot Z_3}, \quad (1)$$

где Z_1 – число периодов беговой дорожки внутренней втулки, $Z_1 = 1$; Z_3 – число периодов многопериодной беговой дорожки наружной втулки; ψ – угол трения, характеризующий трение качения (с коэффициентом f) между шариком и беговой дорожкой, $\psi = \operatorname{arctg}(f)$.

Для заданных параметров ($R = 40$ мм, $Z_3 = 4$, $f = 0,02$) оптимальное значение амплитуды составило 22,2 мм.

При исследовании были созданы три идентичные параметрические модели, в которых изменялось только значение амплитуды в соответствии с табл. 1. Второй вариант модели имел теоретически оптимальную амплитуду.

Табл. 1. Параметры моделей

Параметр	Вариант модели		
	1	2	3
Амплитуда A , мм	10	22,2	34,4
Радиус R , мм	40	40	40
Передаточное отношение i	5	5	5

Для третьего и первого вариантов моделей амплитуда изменялась в диапазоне $\pm 12,2$ мм.

Для расчета в постпроцессоре NX использовался решатель Adams, время расчета – 1 с, число шагов – 600.

Исследование кинематических параметров и КПД синусошариковой передачи

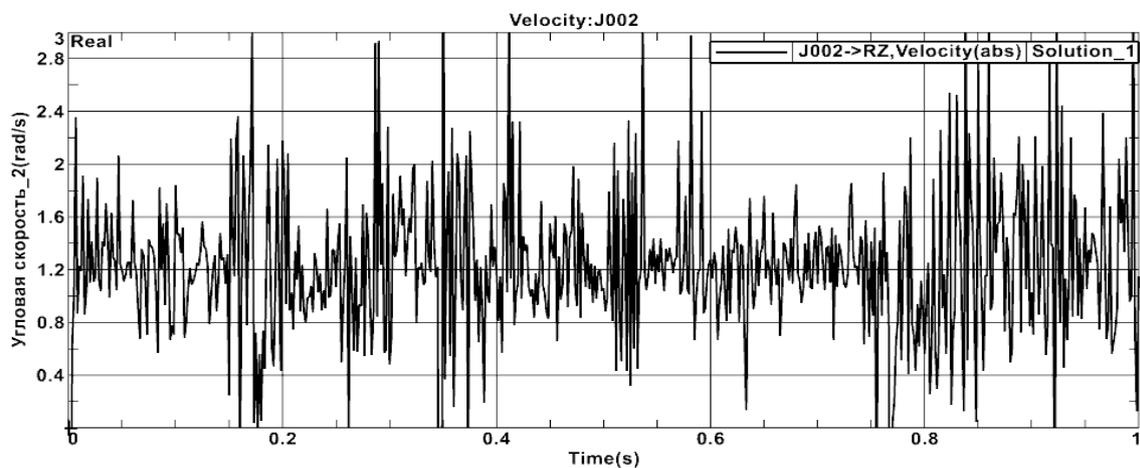
Полученные значения угловой скорости сепаратора ω_2 в течение секунд-

ной симуляции в модуле Motion Simulation системы NX показаны на рис. 2.

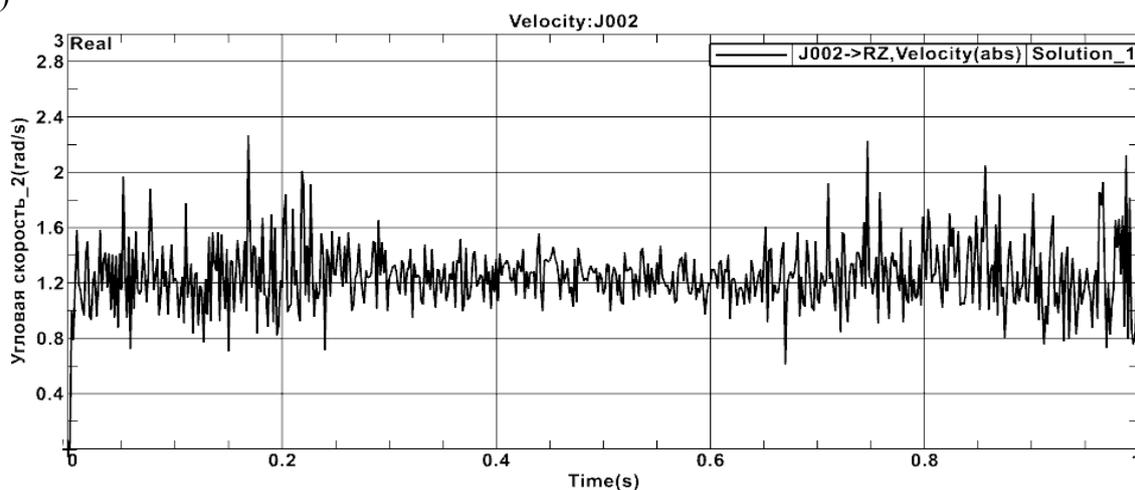
сти сепаратора при различных значениях амплитуды составило 1,25 рад/с.

Среднее значение угловой скорости

а)



б)



в)

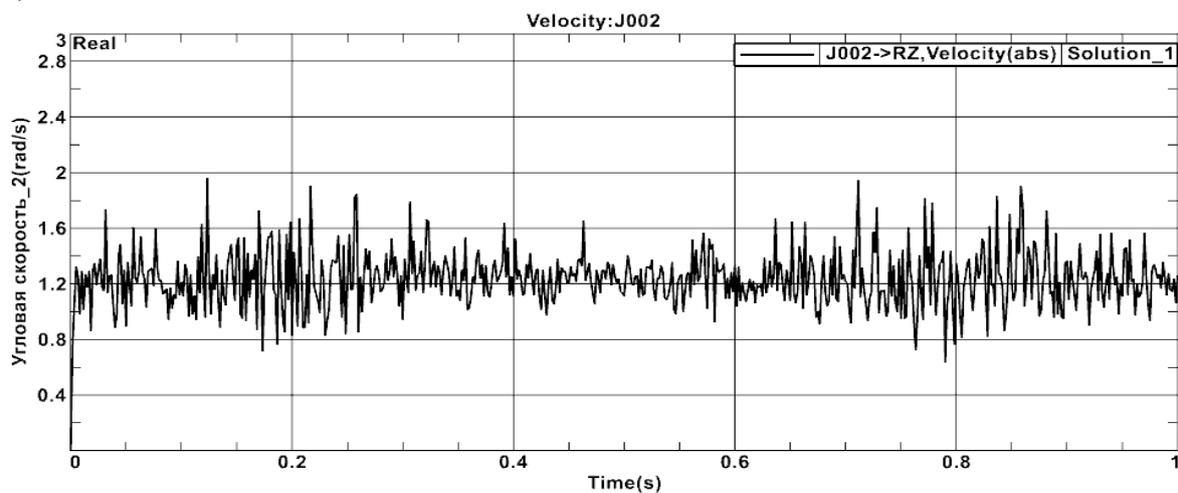


Рис. 2. Изменение угловой скорости сепаратора для моделей с различными амплитудами: а – с амплитудой 10 мм; б – с амплитудой 22,2 мм; в – с амплитудой 34,4 мм

Средняя скорость вращения сепаратора постоянна при различных значениях амплитуды синусошариковой передачи, при этом уменьшение амплитуды, по сравнению с теоретически оптимальным значением, приводит к повышению неустойчивости процесса и увеличению амплитуды колебаний мгновенных значений угловой скорости ведомого вала (сепаратора).

Изменение мгновенных значений момента на внутренней втулке T_{1j} (j – номер варианта модели) в течение секундной симуляции показано на рис. 3. Для соответствующих вариантов моделей были определены средние значения моментов: $T_{11} = 11,8 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $T_{12} = 11,2 \text{ Н}\cdot\text{м}$;

$T_{13} = 12,1 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Поскольку угловые скорости вращения внутренней втулки и сепаратора принимались постоянными (средние значения), то среднее значение КПД рассчитывалось по формуле

$$\eta_j = \frac{P_{2j}}{P_{1j}} = \frac{T_{2j} \cdot \omega_{2j}}{T_{1j} \cdot \omega_{1j}} = \frac{T_{2j}}{T_{1j} \cdot i}, \quad (2)$$

где P_1, P_2 – средние значения мощностей на ведущем и ведомом элементах передачи соответственно.

Средние значения КПД при данных средних значениях моментов приведены в табл. 2.

Табл. 2. КПД для моделей с различной амплитудой

Амплитуда, мм	Параметр		
	$T_2, \text{Н}\cdot\text{м}$	$T_1, \text{Н}\cdot\text{м}$	η
10	50	11,8	0,85
22,2	50	11,2	0,89
34,4	50	12,1	0,83

Результаты компьютерного моделирования подтверждают справедливость формулы (1), по которой определялось оптимальное значение амплитуды беговых дорожек.

Компьютерное исследование сепаратора синусошарикового редуктора

В задачи исследования входило проведение анализа методом конечных элементов сепаратора синусошарикового редуктора. В математической модели передачи беговые дорожки заменяются центровыми кривыми – траекториями центров масс шариков.

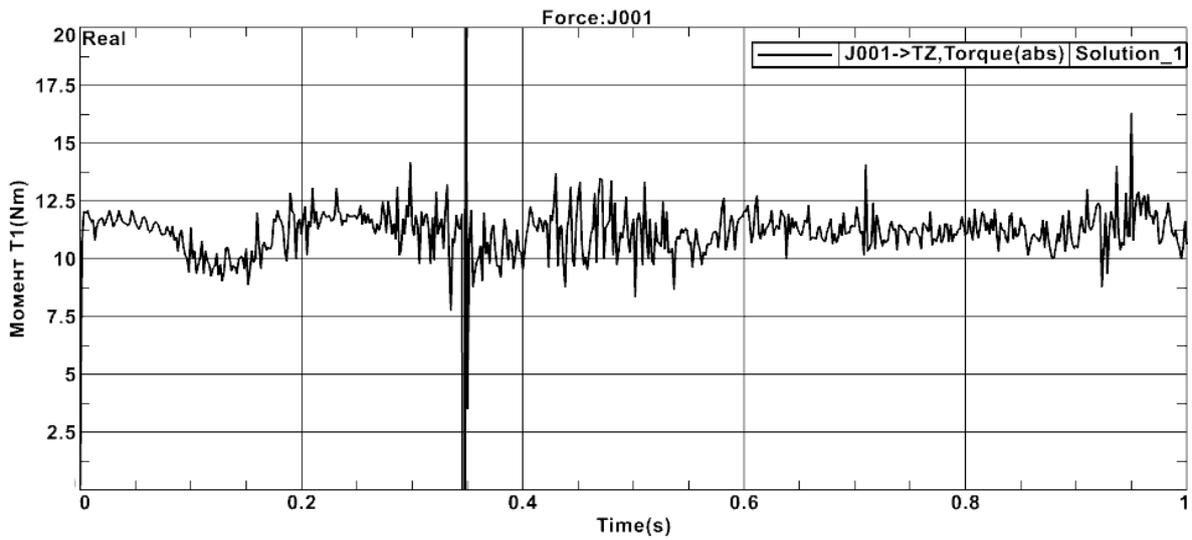
Координаты точек пространственной кривой описываются системой параметрических уравнений

$$\begin{cases} x = R \cdot \cos(\varphi); \\ y = R \cdot \sin(\varphi); \\ z = A \cdot \sin(\varphi), \end{cases} \quad (3)$$

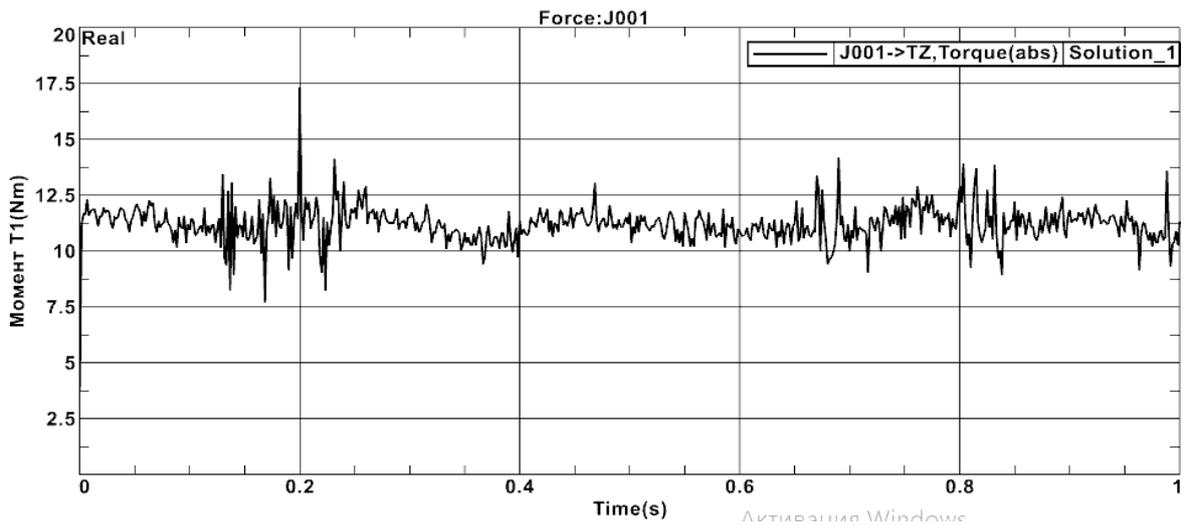
где φ – центральный угол, отсчитываемый в плоскости xOy , где располагается средняя окружность с радиусом R .

Первых два уравнения системы описывают движение точки вдоль средней окружности при изменении центрального угла от 0 до 2π . Третье уравнение является уравнением синусоиды, описывающим колебания точки относительно оси Oz . На сепараторе располагаются точки пересечения двух синусоид. Расстояние Δ между этими точками равно $2 \cdot \pi/5$. В табл. 3 приведены координаты точки в зависимости от значения угла φ .

a)



b)



в)

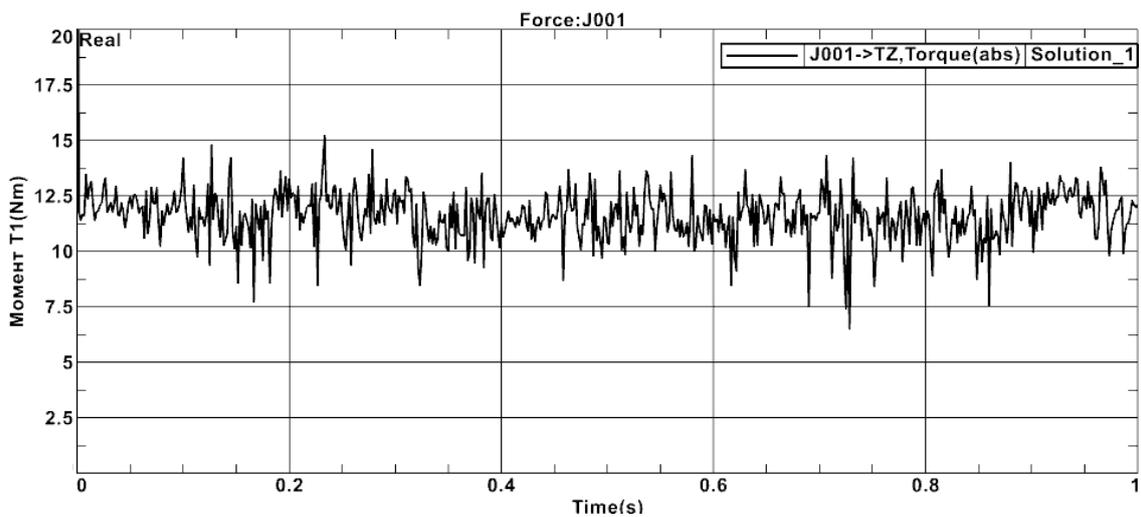


Рис. 3. Изменение момента на внутренней втулке для моделей с различными амплитудами: а – с амплитудой 10 мм; б – с амплитудой 22,2 мм; в – с амплитудой 34,4 мм

Табл. 3. Координаты точки в зависимости от значения угла φ

Координата точки	$\varphi_0 = 0$	$\varphi_1 = \frac{2 \cdot \pi}{5}$	$\varphi_2 = \frac{4 \cdot \pi}{5}$	$\varphi_3 = \frac{6 \cdot \pi}{5}$	$\varphi_4 = \frac{8 \cdot \pi}{5}$
x	40	12,36067978	-32,36067978	-32,36067978	12,36067978
y	0	38,04226065	23,51141009	-23,51141009	-38,04226065
z	0	-9,510565163	-5,877852523	5,877852523	9,510565163

Данные точки являются координатами центров масс шариков. Примем допущение о равномерности распределения нагрузки между телами качения. Шарик действует на внутреннюю поверхность паза сепаратора с силой

$$F = \frac{T_2}{R \cdot n}, \quad (4)$$

где T_2 – момент, действующий на сепаратор, Н·м; R – радиус образующей окружности цилиндрической синусоиды; n – количество шариков, $n = 5$.

При заданном $T_2 = 50$ Н·м, радиусе $R = 40$ мм и числе шариков $n = 5$ сила $F = 250$ Н.

Данная сила действует на точки, находящиеся на поверхности пазов сепаратора и являющиеся проекциями центров масс шариков.

Для анализа прочности сепаратора в NX использовалась ранее созданная его модель. Дальнейший анализ проводился в модуле Design Simulation. Задавались решатель (NX Design Simulation) и тип анализа (Structural). Тип элементов сетки – CTETRA(10), размер элемента – 1 мм. Материал сепаратора Steel выбирался из библиотеки материалов, который по своим механическим характеристикам сопоставим с улучшенной конструкционной сталью 45.

Для приложения сосредоточенных сил первоначально задавались точки согласно табл. 3. Далее полученные точки проектировались на грани сепаратора. Для этого во вкладке Point выбирался тип точки Projected Point. В качестве объекта, на который проектируется

точка, указывались поверхности (грани) паза сепаратора, а в качестве проецируемых точек поочередно принимались центры масс шариков.

Далее перестраивалась сетка конечных элементов, чтобы совместить некоторые из ее узлов с построенными точками. Для этого был необходим переход в раздел программы Pre/Post. В появившемся диалоговом окне конструктора точек сетки выбирался тип Projected Point, в разделе Object to Project – грань, на которой расположена ранее созданная точка, а в разделе Point – созданные ранее точки. Обновление сетки проводилось в блоке Design Simulation редактированием файла симуляции (*.sim). Необходимо было, чтобы элементы сетки, находящиеся рядом с ранее созданным узлом, изменили форму и перестроились таким образом, чтобы узел сетки стал общей вершиной этих элементов.

Силы, действующие на созданные точки, задавались перпендикулярно грани сепаратора. Для этого использовались инструменты Load Type и далее – Force. В появившемся окне устанавливалась опция Normal, значение силы – 250 Н. Для фиксации сепаратора у одного из торцов применялся инструмент Fixed Constraint (жесткая заделка).

Навигатор постпроцессора позволяет отобразить результаты смещения, вращения, напряжения по элементам и по узлам, приложенные силы, силы и момент реакции и др. Деформированное состояние сепаратора под действием нагрузок показано на рис. 4.

Из результатов моделирования

следует, что при данных условиях максимальная деформация сепаратора составит 0,0053 мм. Такая деформация является допустимой исходя из 7-й степени точности изготовления деталей.

Результаты моделирования напряжений, распределяемых в теле сепаратора

под действием приложенного крутящего момента, распределяемого по пяти точкам контакта, показаны на рис. 5.

Максимальные напряжения по критерию Фон Мизеса составляют 283,14 МПа, что ниже предела текучести для заданного материала.



Рис. 4. Распределение деформаций в сепараторе



Рис. 5. Распределение напряжений в сепараторе

Заключение

Разработан алгоритм виртуальных испытаний редукторных механизмов в системе NX, позволяющий определить угловую скорость (частоту) вращения ведомого вала при заданной скорости ведущего вала. Алгоритм также дает возможность оценить среднее значение КПД проектируемого редуктора при заданных нагрузках и определить рациональные геометрические параметры до этапа проведения натуральных испытаний экспериментальных образцов. Результа-

тами компьютерного моделирования подтверждена теоретическая зависимость для определения амплитуды беговых дорожек синусошариковой передачи, обеспечивающая минимальные потери мощности при заданных радиусе R , числе периодов Z и коэффициентах трения f . Проведена оценка прочности сепаратора передачи методом конечных элементов на основе разработанного алгоритма распределения нагрузки по числу n параллельных потоков (тел качения).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зубчатые передачи и трансмиссии в Беларуси: проектирование, технология, оценка свойств: монография / В. Б. Альгин [и др.]; под общ. ред. В. Б. Альгина, В. Е. Старжинского. – Минск: Беларуская навука, 2017. – 407 с.
2. **Лустенков, М. Е.** Шариковые планетарные передачи для средств малой механизации / М. Е. Лустенков // Вестн. машиностроения. – 2004. – № 6. – С. 15–17.
3. **Игнатищев, Р. М.** Синусошариковые редукторы / Р. М. Игнатищев. – Минск: Вышэйшая школа, 1983. – 107 с.: ил.
4. **Лустенков, М. Е.** Механизм с изменяющимся углом между осями валов / М. Е. Лустенков, Е. С. Фитцова // Вестн. Брянского гос. техн. ун-та. – 2014. – № 1. – С. 46–50.
5. **Лустенков, М. Е.** Теоретические и экспериментальные исследования сферических роликовых передач / М. Е. Лустенков, Е. С. Лустенкова // Вестн. Ижевского гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 23–27.
6. **Лустенков, М. Е.** Определение основных геометрических параметров планетарных шариковых передач / М. Е. Лустенков // Сборка в машиностроении и приборостроении. – 2008. – № 1. – С. 12–17.
7. **Лустенков, М. Е.** Определение КПД передач с составными промежуточными телами качения / М. Е. Лустенков // Изв. вузов. Машиностроение. – 2014. – № 6. – С. 13–19.
8. **Лустенков, М. Е.** Расчет геометрии адаптированного профиля эллипсной шариковой передачи / М. Е. Лустенков // Технология машиностроения. – 2005. – № 5. – С. 36–38.
9. **Lustenkov, M. E.** Strength calculations for cylindrical transmissions with compound intermediate rolling elements / M. E. Lustenkov // Int. J. of Mechanisms and Robotic Systems. – 2015. – Vol. 2, № 2. – P. 111–121.
10. **Lustenkov, M. E.** Load Capacity of Spherical Roller Transmission with Double-Row Pinion / M. E. Lustenkov, E. S. Lustenkova // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – 795 (2020) 012020. – 6 p.
11. **Лустенков, М. Е.** Передачи с промежуточными телами качения: определение и минимизация потерь мощности: монография / М. Е. Лустенков. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2010. – 274 с.: ил.

Статья сдана в редакцию 23 июня 2023 года

Контакты:

fittsova@gmail.com (Лустенкова Екатерина Сергеевна);
serge070802@gmail.com (Зыль Сергей Андреевич).

E. S. LUSTENKOVA, S. A. ZYL

SIMULATION OF SINUS-BALL TRANSMISSION OPERATION IN SIEMENS NX SYSTEM

Abstract

The article deals with computer simulation of a new type of mechanical transmission. An algorithm has been developed to study the parameters of sinus-ball transmission in the kinematics and finite element analysis modules of the NX CAD system. Sinus-ball transmissions have found application in well drilling equipment and mechanized tools, and the possibility of their use to create differential and multiplier mechanisms is currently being considered. In the model developed, rolling elements (balls) move along race tracks made in the form of sinusoidal curves with the same amplitude closed on cylindrical surfaces. The race tracks are made on the cylindrical surfaces of inner and outer bushings. Between the two bushings there is a separator (carrier), which has axial grooves along which the balls move, forcing the separator to rotate at a reduced speed. Algorithms for determining the average value of transmission efficiency at the design stage have been developed. Deformations and stresses arising in the separator, as the weakest element of the mechanism, have been studied.

Keywords:

sinus-ball transmission, rolling elements, speed reducer, separator, finite element method, efficiency.

For citation:

Lustenkova, E. S. Simulation of sinus-ball transmission operation in Siemens NX system / E. S. Lustenkova, S. A. Zyl // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 3 (80). – P. 66–75.

DOI: 10.53078/20778481_2023_3_76

УДК 621.787.6

В. М. ПАШКЕВИЧ, д-р техн. наук, проф.

В. А. ПОПКОВСКИЙ, канд. техн. наук, доц.

В. В. АФАНЕВИЧ

А. В. ТЮРИНА

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАКЛЕПА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ УПРАВЛЯЕМОЙ ИНЕРЦИОННО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА

Аннотация

Представлены результаты моделирования упругопластического удара деформирующего шара по обрабатываемой поверхности при инерционно-импульсной обработке. В качестве материала деформирующего шара использована закаленная сталь ШХ15, в качестве обрабатываемого материала – специальный высокопрочный чугун с шаровидным графитом. Даны рекомендации по использованию режимов инерционно-импульсной обработки.

Ключевые слова:

поверхностно-пластическое деформирование, инерционно-импульсная обработка, высокопрочный чугун, конечно-элементное моделирование, остаточные напряжения, следы от деформирующих элементов.

Для цитирования:

Моделирование процесса наклепа поверхности при управляемой инерционно-импульсной обработке изделий из высокопрочного чугуна / В. М. Пашкевич, В. А. Попковский, В. В. Афаневич, А. В. Тюрина // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 3 (80). – С. 76–84.

Введение

Для отделочно-упрочняющей обработки внутренних цилиндрических поверхностей деталей, изготавливаемых из высокопрочного чугуна, используются различные способы. Кроме снижения шероховатости, они создают наклеп поверхности, обеспечивающий повышение ее износостойкости. Одним из распространенных способов является, например, дробеструйная обработка. Наряду с простотой реализации, ей свойственны и недостатки, среди которых – слабая управляемость процесса, необходимость использования системы рекуперации абразива, наличие специальной камеры. Альтернативу дробеструйной может составить инерционно-импульсная обработка (ИИО), которая лишена указанных недостатков. Главным преимуществом ИИО является

возможность обеспечения управляемости технологического процесса как за счет обеспечения частично регулярного микрорельефа поверхности, так и за счет получения требуемых характеристик упрочнения. Используемый инструмент может применяться с металлорежущим оборудованием широко распространенных групп – токарной, сверлильной, фрезерной.

На рис. 1 представлен чертеж инструмента для ИИО цилиндрических отверстий. При использовании представленного инструмента вращение от обрабатываемой заготовки передается через цангу 9 с фрикционными кольцами 10 на торцовый шаровой редуктор, включающий ведущее 5 и ведомое звено 4, которое одновременно является опорным элементом для деформирующих шаров 3. Опорный элемент, взаимодействуя с диском 2 с радиальными

пазами, приводит в движение деформирующие шары, которые, таким образом, движутся в радиальном направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности, и наносят по ней удары. При этом изменение частоты вращения заготовки приводит к изменению скорости движения деформирующих шаров в направлении обрабатываемой поверх-

ности в момент совершения удара по ней. Изменение подачи инструмента в осевом направлении позволяет покрывать всю обрабатываемую поверхность следами от ударов деформирующих шаров, при этом совокупность таких следов имеет регулярные или частично регулярные характеристики.

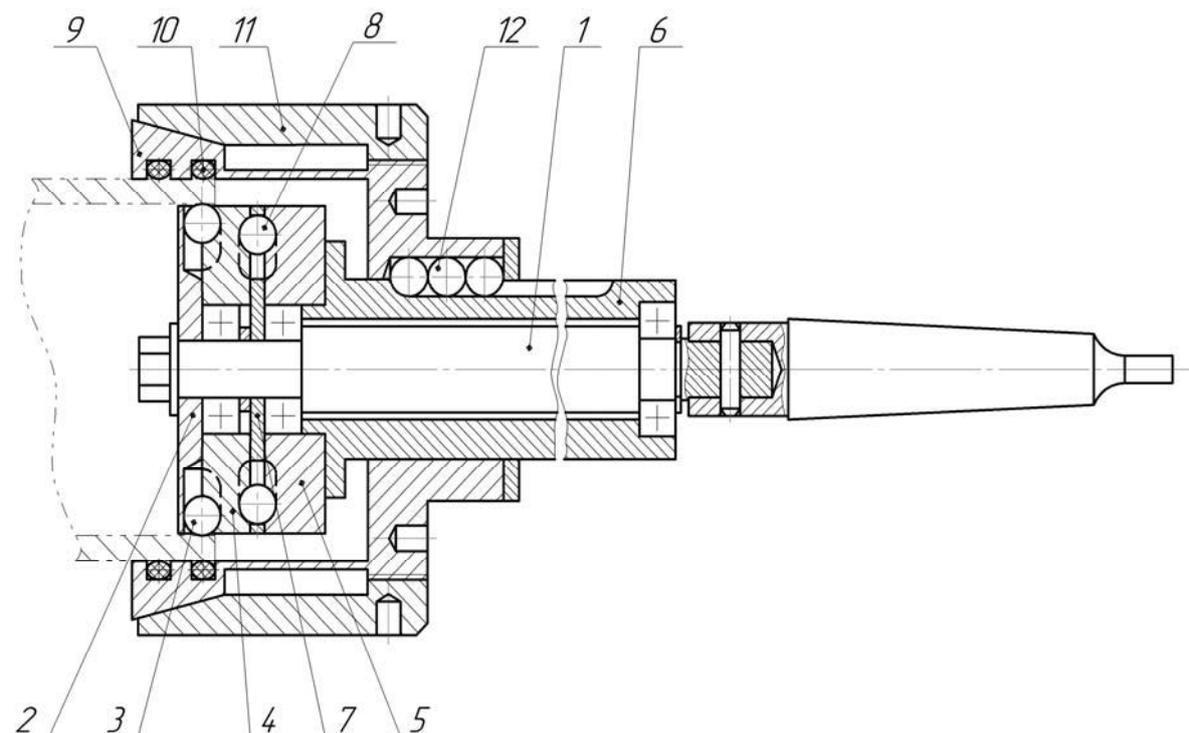


Рис. 1. Инерционно-импульсный раскатчик отверстий

Для исследования процесса ИИО требуется создание компьютерной модели, имитирующей удар шара по обрабатываемой поверхности. Построению такой модели и изучению характеристик процесса ИИО посвящена представленная работа.

Моделирование процесса наклена поверхности при инерционно-импульсной обработке

Цель работы – построение компьютерной модели и численное исследование процесса инерционно-импульс-

ной обработки цилиндрических отверстий в изделиях из высокопрочного чугуна.

Методами исследования являются численные методы (в том числе метод конечных элементов, реализованный в среде SolidWorks), а также методы аппроксимации численных данных.

В среде SolidWorks с использованием метода конечных элементов была разработана модель упругопластического удара деформирующего шара по обрабатываемой поверхности.

Объектами моделирования являлись: обрабатываемая поверхность из

специального высокопрочного чугуна, близкого по характеристикам к чугуну ВЧ60 (ГОСТ 7293–85) с шаровидным графитом; деформирующие шары диаметром 10 мм, выполненные из закаленной конструкционной подшипниковой стали ШХ15 (ГОСТ 801–78).

С точки зрения механики твердого деформируемого тела основные трудности вызывает тот факт, что при моделировании необходимо учитывать различного рода нелинейности. Они связаны как с учетом физической нелинейности, вызванной упругопластическим деформированием обрабатываемого материала, так и с геометрической нелинейностью, выраженной в изменении площади контакта в процессе соударения шара с обрабатываемой поверхностью. Учет в модели таких нелинейностей приводит к значительному увеличению времени вычислений из-за использования итерационных алгоритмов и усложняет процесс обеспечения сходимости результа-

тов расчета к реальным данным.

Для упрощения модели и уменьшения времени вычислений был применен принцип, сформулированный Сен-Венаном в рамках теории упругости. В соответствии с ним если к какой-либо малой по сравнению с размерами всего тела части приложена статически уравновешенная система сил, то она вызывает напряжения, быстро убывающие по мере удаления от места приложения. Данный принцип позволяет заменять одни граничные условия (действующие силы) на другие (удобные для статических расчетов) и называется методом смягчения граничных условий.

Учитывая осесимметричный характер модели и используя принцип Сен-Венана, была предложена усовершенствованная модель упругопластического удара в области контакта. На рис. 2 показана ее реализация в среде SolidWorks.

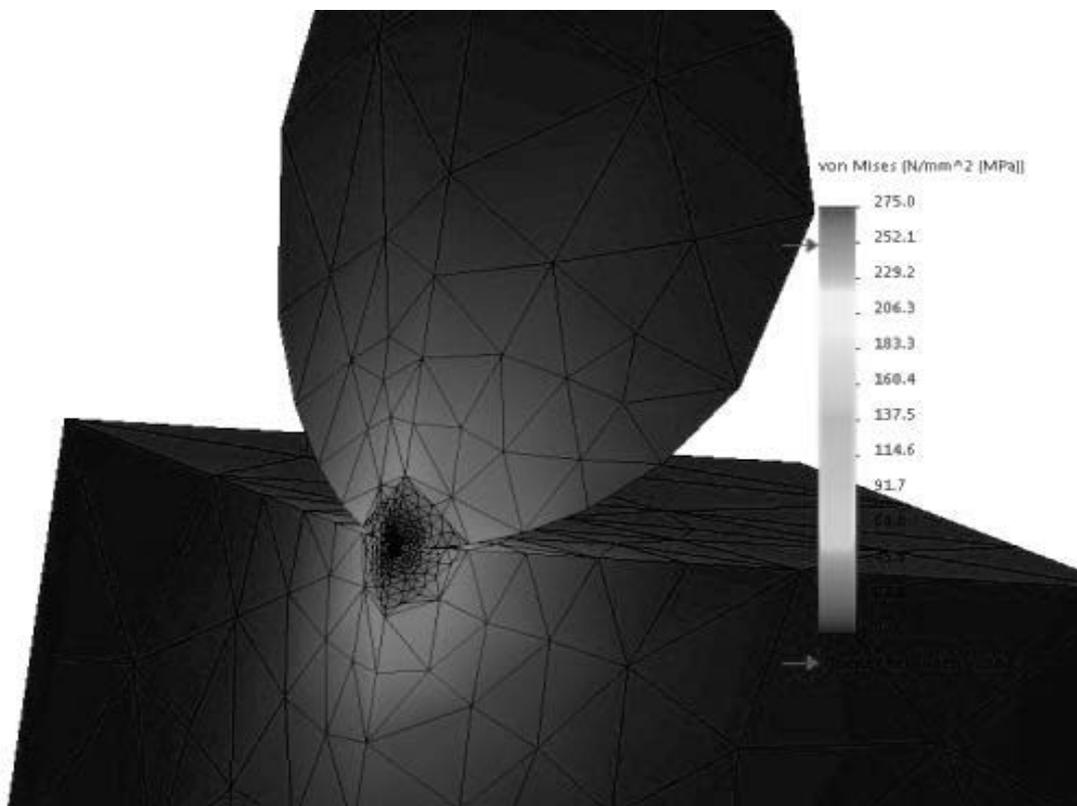


Рис. 2. Модель упругопластического удара в среде SolidWorks

Из рисунка видно, что площадь обрабатываемой поверхности многократно превышает площадь пятна контакта двух объектов. Данное обстоятельство позволяет исключить влияние краевого эффекта на напряженно-деформированное состояние обрабатываемой поверхности.

Кроме того, на рис. 2 можно видеть, что в данной конечно-элементной модели имеет место неравномерная сетка разбиения на конечные элементы со значительным их измельчением в зоне пятна контакта объектов (линейный размер самого крупного элемента более чем в 20 раз превосходит размер наибо-

лее мелкого). Этого удалось достичь посредством выделения малого объема на шаре и пластине в зоне контакта. Необходимость такого измельчения объясняется тем, что в зоне контакта отмечаются значительные градиенты напряжений, адекватное описание которых предполагает мелкую сетку элементов. В этой области были использованы конечные элементы, ребра которых не превышали 0,05 мм.

В качестве конечных элементов использовались тетраэдральные десятиузловые элементы повышенной точности (рис. 3).

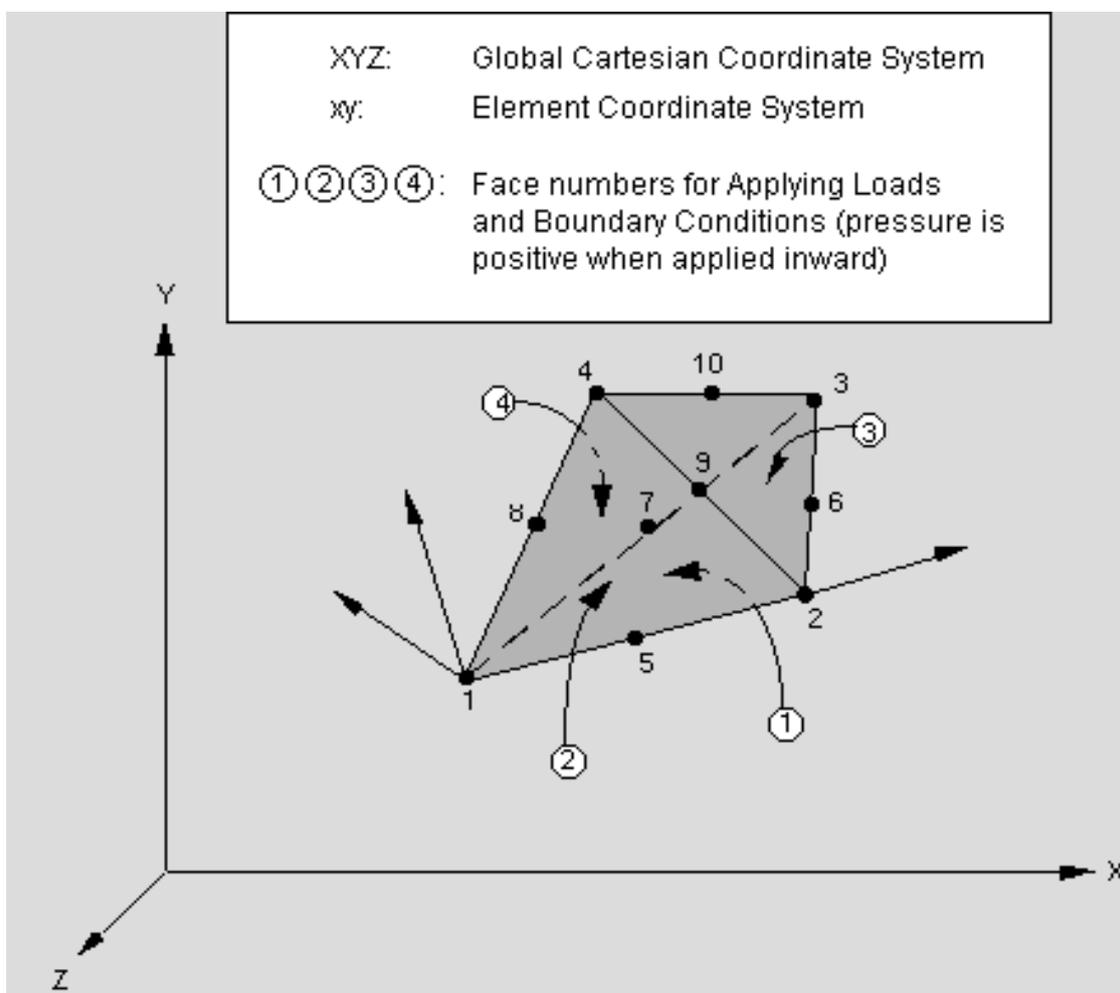


Рис. 3. Тетраэдральный конечный элемент, используемый при расчетах напряженно-деформированного состояния, возникающего в процессе инерционно-импульсной обработки

В модели варьируется скорость движения деформирующего шара в момент нанесения удара по обрабатываемой поверхности.

При моделировании исследовались перемещения материала обрабатываемой поверхности, а также остаточные напряжения, возникающие в ней.

При моделировании принято, что шероховатость шара и обрабатываемой поверхности, а также погрешности их формы и расположения отсутствуют. Принято, что удар наносится в направлении, строго перпендикулярном обрабатываемой поверхности; обрабатываемая поверхность в точке контакта условно плоская. При моделировании по обрабатываемой поверхности наносится единичный удар, возможные повторные

удары при этом не рассматриваются.

Перед началом расчетов численным путем проводилось определение периода взаимодействия деформирующего шара и обрабатываемой поверхности (от момента соприкосновения шара с поверхностью до ее восстановления и стабилизации выходных параметров модели). Для большинства численных экспериментов это время принималось равным $6 \cdot 10^{-6}$ с.

В результате моделирования было установлено, что след от удара деформирующего шара по поверхности имеет форму кратерообразной лунки (рис. 4) (увеличение по вертикальной оси – 100 раз), что хорошо согласуется с данными экспериментов.

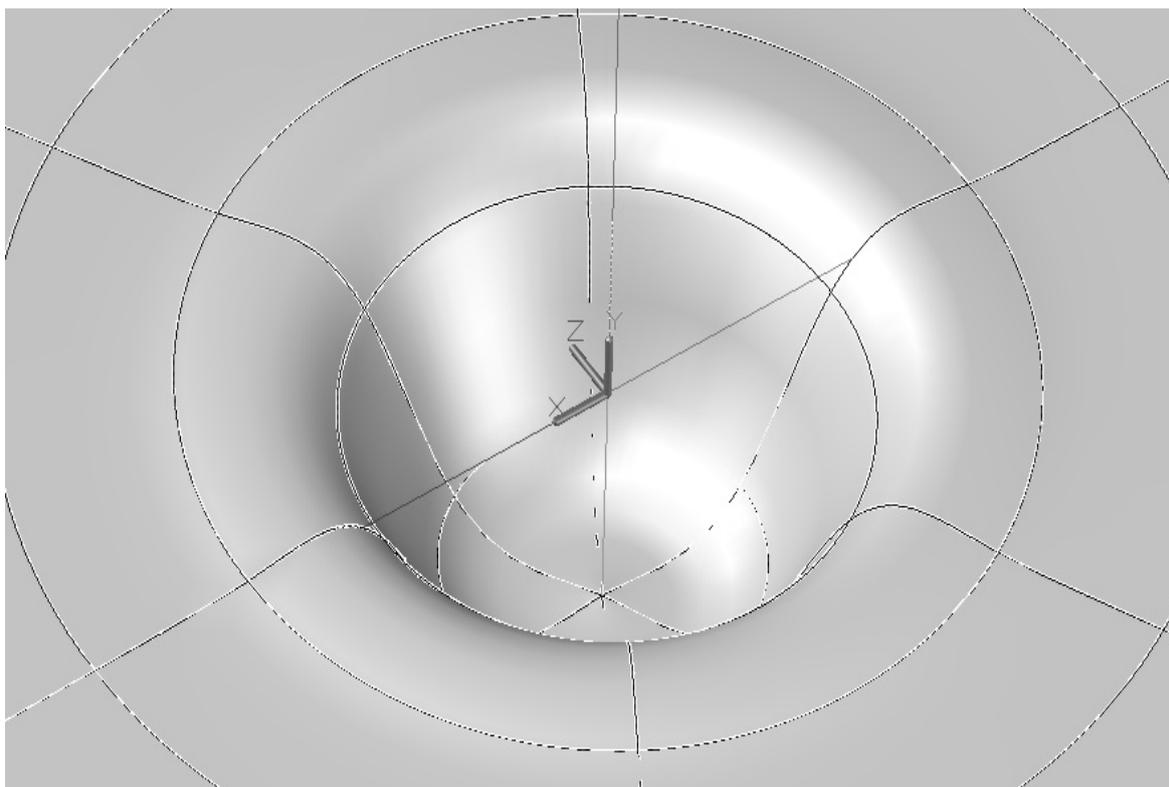


Рис. 4. След от деформирующего шара

Из рисунка видно, что после нанесения удара деформирующим шаром по обрабатываемой поверхности происходят несколько явлений формообразова-

ния нового микрорельефа.

Во-первых, в средней области следа деформирующего шара (лунке) происходит течение материала и последу-

ющее восстановление поверхности с образованием большей или меньшей пучности. Величина пучности особенно заметна у пластичных материалов (сталь) и в меньшей степени у чугунов (в последнем случае она относительно выше при слабых ударах).

Во-вторых, материал из лунки выдавливается в периферийные области, что приводит к образованию на обрабатываемой поверхности пучности в форме кольцеобразного валика, наружные склоны которого асимптотически стремятся к уровню исходной поверхности.

В-третьих, в реальных условиях при сочетании удара шара в радиальном направлении с вращением обрабатываемой заготовки в тангенциальном след

удара «размазывается», происходит частичное выглаживание поверхности, а форма лунки приобретает эллипсоидную, вытянутую форму.

Сочетание трех описанных явлений приводит к тому, что форма микрорельефа обработанной поверхности представляет собой совокупность кратерообразных областей.

После ИИО величина остаточных напряжений по глубине обрабатываемой заготовки характеризуется нелинейной зависимостью (рис. 5), а при заметном удалении от обрабатываемой поверхности эта величина стремится к нулю. По этой причине оценка глубины (пределов) упрочненного слоя вызывает определенные сложности.

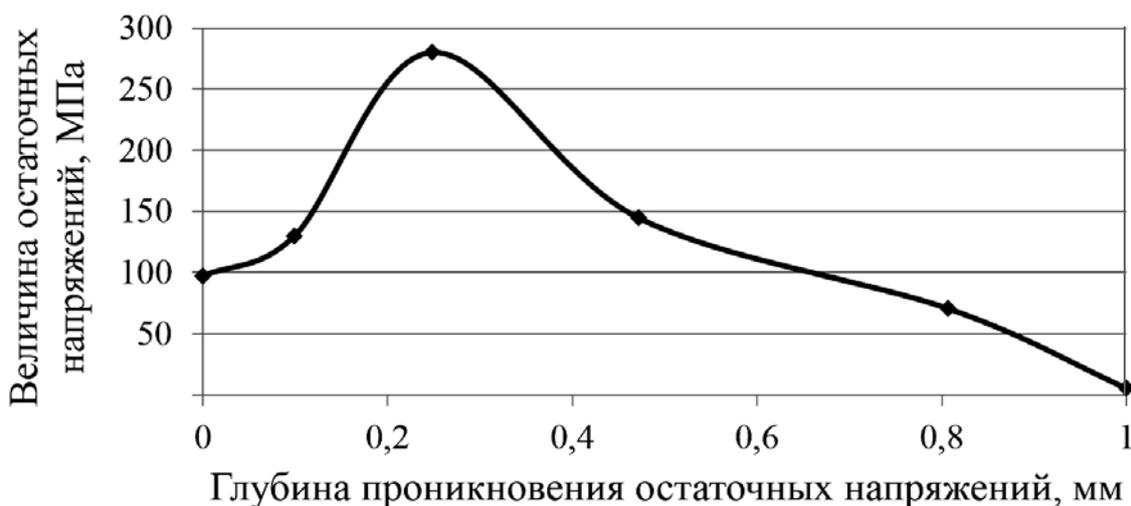


Рис. 5. Распределение остаточных напряжений по глубине материала под местом нанесения удара: материал деформирующего шара – ШХ15; материал заготовки – высокопрочный чугун; диаметр шара – 10 мм; скорость шара – 1,5 м/с

Для практических целей можно предложить следующий оценочный критерий.

Под глубиной наклепа будем понимать глубину, на которой остаточные напряжения превышают их максимально допустимую величину для материала в состоянии поставки. Для стабилизированных изделий из пластичных высокопрочных чугунов остаточные напряже-

ния не должны превышать 20 %...40 % предела их текучести. Так, например, для чугуна марки ВЧ60 предел текучести σ_t составляет 370 МПа. Для таких материалов в качестве максимально допустимого значения остаточных напряжений принята величина, равная 30 % предела текучести, т. е. 111 МПа.

Полученная в результате моделирования зависимость глубины проник-

новения остаточных напряжений вглубь материала от скорости деформирующе-

го шара в момент нанесения удара по поверхности представлена на рис. 6.

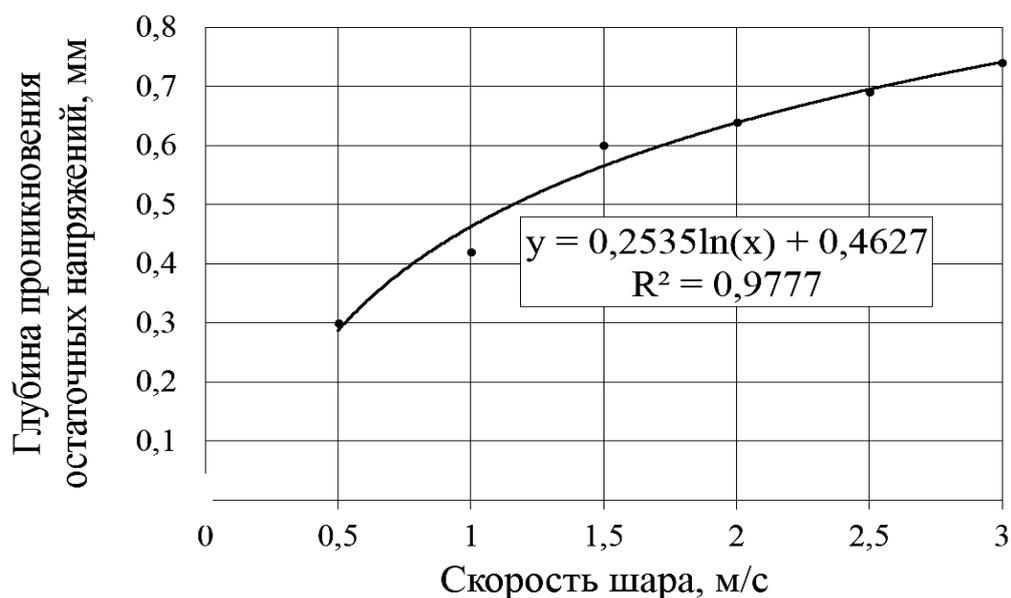


Рис. 6. Зависимость глубины проникновения остаточных напряжений от скорости деформирующего шара

Остаточные напряжения наклепа при этом располагаются в подповерхностном слое как на склонах лунки следа, так и на склонах валика следа.

При этом наибольшие значения остаточных напряжений, как показывают результаты моделирования, наблюдаются как в области лунки следа, предшествующей ее переходу к валику (подповерхностный микрорельеф), так и в области самого валика (надповерхностный микрорельеф). Также остаточные напряжения имеют заметную величину в областях за пределами следа, под примыкающей к валику исходной поверхностью заготовки, особенно при больших скоростях удара. Данный результат иллюстрирует совмещенный график, на котором представлена зависимость расположения остаточных напряжений на обрабатываемой поверхности по мере удаления от точки удара (рис. 7).

Из рисунка видно, что остаточные напряжения на обработанной поверхно-

сти по мере удаления от точки нанесения удара уменьшаются и характер этих изменений сохраняется при различных скоростях деформирующего шара.

По нашему мнению, оценить размеры области наклепа на поверхности возможно, если образованный микрорельеф поверхности рассматривать с точки зрения его будущего контакта с сопряженной поверхностью. Очевидно, что этот контакт будет происходить в основном в области валика и на начальном этапе приработки поверхностей трения не будет затрагивать область лунки. Радиус этой области соответствует переходу величины остаточных напряжений к значениям, меньшим максимально допустимой величины для материала в состоянии поставки (в качестве границы остаточных напряжений, как и ранее, была принята величина 111 МПа).

Очевидно, что остаточные напряжения со значениями, превышающими эту величину, располагаются в области,

имеющей форму кольца. На рис. 8 представлена полученная в результате моде-

лирования зависимость ширины такой области от скорости шара.

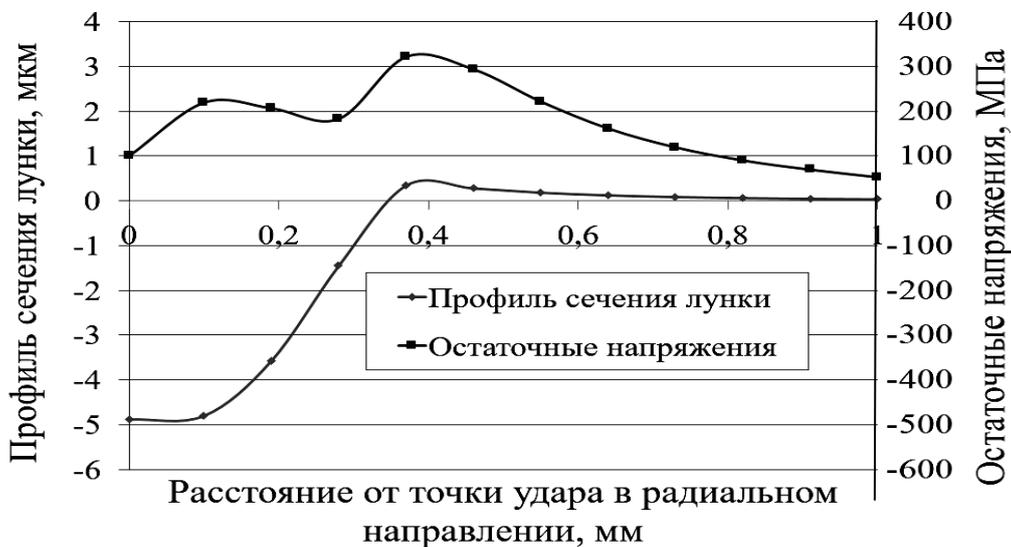


Рис. 7. Зависимость расположения остаточных напряжений на обрабатываемой поверхности по мере удаления от точки удара, наложенная на полупрофиль лунки

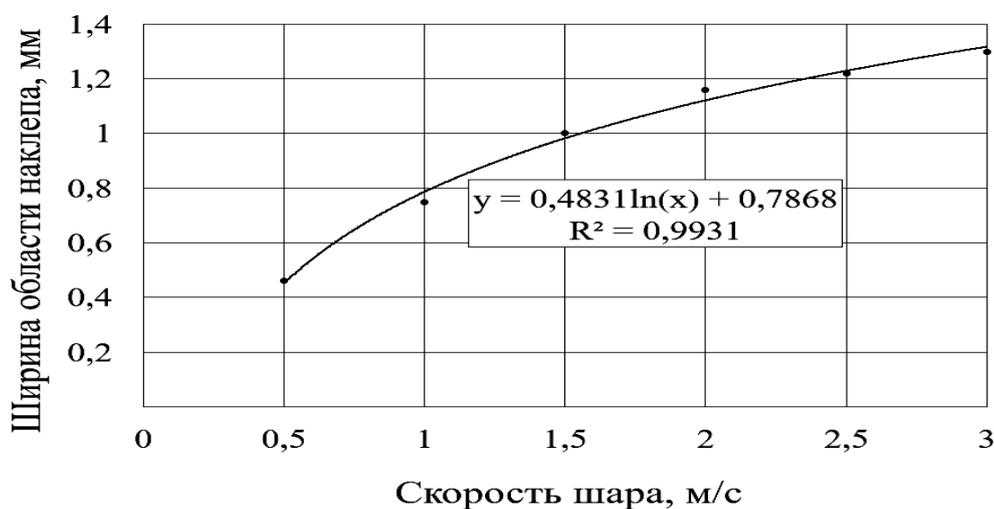


Рис. 8. Зависимость ширины области наклепа с остаточными напряжениями от скорости шара

Как видно из графика, зависимость носит нелинейный характер и стремится к некоторому насыщению. Также очевидно, что значительное увеличение скорости удара не приводит к заметному возрастанию ширины области наклепа, что позволяет рекомендовать для ИИО режимы обработки, обеспечивающие скорость шара в преде-

лах 1...3 м/с. Данные результаты согласуются с экспериментальными данными. Однако отметим, что приведенные рекомендации справедливы лишь в части обеспечения заданной величины наклепа поверхности и не учитывают требуемого снижения шероховатости поверхности.

Выводы и обсуждение результатов

1. В результате выполнения численного моделирования подтверждена гипотеза о возможности управления процессом упрочнения высокопрочных чугунов на основе ИИО.

2. Управление процессом ИИО можно осуществлять за счет изменения частоты вращения заготовки, приводящей к изменению скорости деформирующего шара. Изменение подачи инструмента в осевом направлении влияет

на плотность покрытия поверхности следами обработки.

3. Для реализации ИИО рекомендуется использовать режимы, обеспечивающие скорость шара в момент удара в интервале 1...3 м/с, которые приводят к возникновению остаточных напряжений, достигающих величин 250...300 МПа, до глубины 0,4...0,75 мм. Остаточные напряжения на поверхности заготовки локализуются в областях диаметром до 0,8...1,3 мм.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инерционно-импульсный раскатчик: пат. ВУ 12381 / В. М. Пашкевич, В. В. Афаневич. – Опубл. 30.08.2020.
2. **Афаневич, В. В.** Моделирование процесса формирования микрорельефа поверхности при инерционно-импульсной обработке / В. В. Афаневич, В. М. Пашкевич, В. А. Попковский // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2019. – № 4 (65). – С. 5–14.
3. **Пашкевич, В. М.** Управляемое инерционно-импульсное раскатывание внутренних цилиндрических поверхностей / В. М. Пашкевич, В. В. Афаневич, К. А. Максимов // Машиностроение и металлообработка: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Могилев – Бобруйск, 10–11 окт. 2019 г. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2019. – С. 48.
4. **Pashkevich, V.** Simulation of micro- and macro-relief topography surfaces during inertial impact treatment / V. Pashkevich, V. Afanevich, V. Popkovsky // Polish journal of science. – 2020. – Vol. 1, № 33. – С. 29–36.

Статья сдана в редакцию 13 июля 2023 года

Контакты:

rvm@bk.ru (Пашкевич Виктор Михайлович);
viktorpopkovski@mail.ru (Попковский Виктор Александрович);
vitas-ik@tut.by (Афаневич Виталий Викторович);
angelina.turina.01@mail.ru (Тюрина Ангелина Викторовна).

V. M. PASHKEVICH, V. A. POPKOVSKY, V. V. AFANEVICH, A. V. TYURINA

MODELING THE PROCESS OF SURFACE HARDENING DURING CONTROLLED INERTIAL PULSE PROCESSING OF HIGH STRENGTH CAST IRON PRODUCTS

Abstract

The paper presents results of modeling the elastic-plastic shock of a deforming ball on a processed surface during inertial pulse processing. Hardened steel SHX15 was used as the material of the deforming ball, and special high strength cast iron with nodular graphite was used as the material to be processed. Recommendations on the use of inertial pulse processing modes are given.

Keywords:

surface plastic deformation, inertial pulse processing, high strength cast iron, finite element modeling, residual stresses, traces of deforming elements.

For citation:

Modeling the process of surface hardening during controlled inertial pulse processing of high strength cast iron products / V. M. Pashkevich, V. A. Popkovsky, V. V. Afanevich, A. V. Tyurina // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 3 (80). – P. 76–84.

DOI: 10.53078/20778481_2023_3_85

УДК 621.822.6

А. П. ПРУДНИКОВ, канд. техн. наук, доц.

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

МЕХАНИЗМ ВЫРАВНИВАНИЯ НАГРУЗКИ МЕЖДУ ТЕЛАМИ КАЧЕНИЯ ПЛАНЕТАРНОЙ ЦЕВОЧНОЙ ПЕРЕДАЧИ ТИПА К-Н-V

Аннотация

Статья посвящена вопросу изучения и разработки механизмов выравнивания распределения нагрузки между цевками в планетарной передаче типа К-Н-V с эвольвентным, циклоидальным и круговым профилями зубьев сателлита. Проведенный анализ зависимости перемещения вершины зуба сателлита позволил определить факторы, влияющие на деформируемость зуба. Подтверждение работоспособности предложенных механизмов обеспечения равномерного распределения нагрузки между цевками получено путем компьютерного моделирования работы передачи.

Ключевые слова:

планетарная передача, цевка, нагрузка, мультипликатор.

Для цитирования:

Прудников, А. П. Механизм выравнивания нагрузки между телами качения планетарной цевочной передачи типа К-Н-V / А. П. Прудников // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 3 (80). – С. 85–94.

Вследствие неизбежных погрешностей при изготовлении и сборке деталей передачи нагрузка между ее звеньями распределяется неравномерно, что приводит к преждевременному выходу мультипликатора из строя. Данная проблема решается путем увеличения коэффициента запаса при проектировании, что приводит к повышению массогабаритных параметров мультипликатора, или усложнением технологии изготовления и контроля его деталей, что увеличивает их себестоимость. Одним из способов обеспечения равномерного распределения нагрузки между зубьями передачи является повышение деформируемости зубчатого колеса, в результате чего при приложении нагрузки вследствие деформации зубьев будут компенсироваться зазоры в зацеплении и нагрузка распределится более равномерно [1].

В качестве передачи для создания мультипликатора предложено использовать планетарную цевочную передачу типа К-Н-V [2], обладающую малыми

потерями на трение, технологичностью при изготовлении и широким диапазоном передаточных отношений. Исследовались следующие виды зацепления в рассматриваемой передаче: эвольвентное, циклоидальное и зацепление на базе кругового профиля зубьев.

Элементом исследуемой передачи, для которого будет повышаться деформируемость, является сателлит. Одним из способов повышения деформируемости его зубьев предложено деление сателлита вдоль оси на набор дисков равной толщины. При этом будет выполняться выравнивание распределения нагрузки вдоль длины зуба (в осевом направлении). В случае погрешности при сборке или изготовлении элементов передачи на зуб одного из дисков будет приходиться большая доля нагрузки, что вызовет его деформацию в направлении действия нагрузки и произойдет выравнивание распределения нагрузки по зубьям всех дисков сателлита.

Перемещение вершины зуба определяется по предложенной зависимости

в соответствии с рис. 1:

$$y_k = \frac{4 \cdot F \cdot l^3}{E \cdot b \cdot a^3}, \quad (1)$$

где F – сила, действующая на линии контакта взаимодействия зуба и цевки, Н; l – расстояние от линии контакта до основания зуба, м; E – модуль упругости материала, из которого изготовлены диски сателлита, Па; b – толщина диска, образующего сателлит, м; a – ширина основания зуба сателлита, м.

Анализ зависимости (1) показывает, что в наибольшей степени на деформируемость зуба влияет расстояние l и ширина основания зуба a . При этом расстояние l в процессе взаимодействия (перекачивания) зубьев сателлита по цевкам неподвижного колеса будет изменяться, ширина a постоянна для передачи с заданными параметрами.

Как видно из рис. 1, наименьшая длина l при наибольшей ширине a наблюдается в передаче с циклоидальным профилем зубьев, т. е. при таком профиле зуба будет минимальная деформируемость зуба, а соответственно, и минимальный эффект от предложенного механизма выравнивания распределения нагрузки между телами качения (цевками).

Максимальная деформируемость зуба будет в случае использования эвольвентного профиля, т. к. при этом будет наибольшая длина l при малой ширине a .

Передача с круговым профилем зубьев с точки зрения деформируемости зуба занимает промежуточное положение.

Конструктивная схема механизма выравнивания распределения нагрузки между телами качения (цевками) приведена на рис. 2.

Используя компьютерное моделирование в САПР SolidWorks, определим величину деформации зубьев сателлита в случае эвольвентного, циклоидального и кругового профилей зубьев.

Рассмотрим планетарную цевочную передачу типа К-Н-V со следующими параметрами: число цевок на зафиксированном колесе $z_2 = 45$; число зубьев сателлита $z_1 = 36$; длина цевки $h = 4$ мм; ширина диска сателлита $b = 2$ мм (сателлит состоит из двух дисков); модуль $m = 3$ мм; диаметр цевок $d_{ц} = 3$ мм; делительные диаметры $d_1 = 108$ мм, $d_2 = 135$ мм (при моделировании циклоидально-цевочного зацепления на диаметре d_2 располагаются оси цевок, а диаметр d_1 используется в качестве диаметра направляющей окружности, по которой катится цевка). Вращающий момент на сателлите задавался равным 40 Н·м.

Результаты компьютерного моделирования приведены на рис. 3–5.

Таким образом, увеличение максимальных перемещений зубьев при использовании предложенного механизма выравнивания распределения нагрузки между зубьями составило:

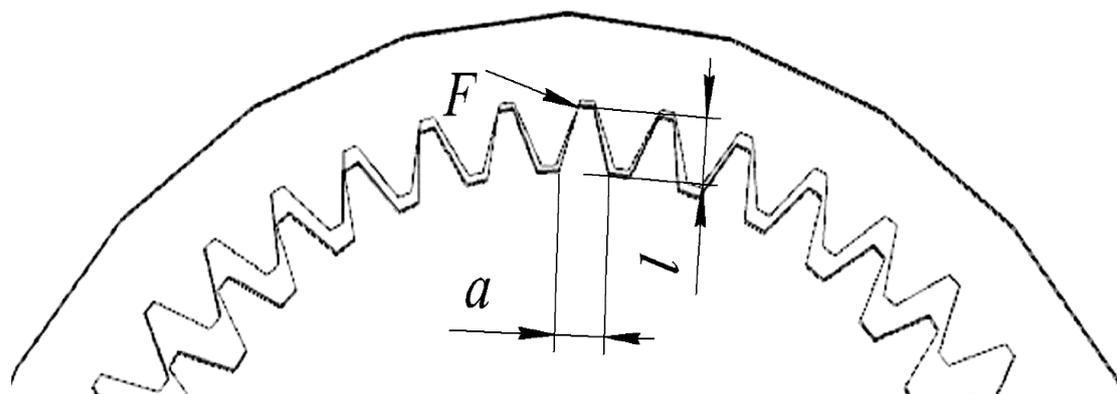
- для эвольвентного профиля зубьев 16,1 %;
- для циклоидального профиля зубьев 0,3 %;
- для кругового профиля зубьев 6,5 %.

Анализ полученных в ходе компьютерного моделирования результатов позволяет утверждать, что с предложенным механизмом выравнивания распределения нагрузки между зубьями наибольшей деформируемостью обладает передача с эвольвентным и круговым профилями зубьев, для циклоидального профиля эффект незначительный.

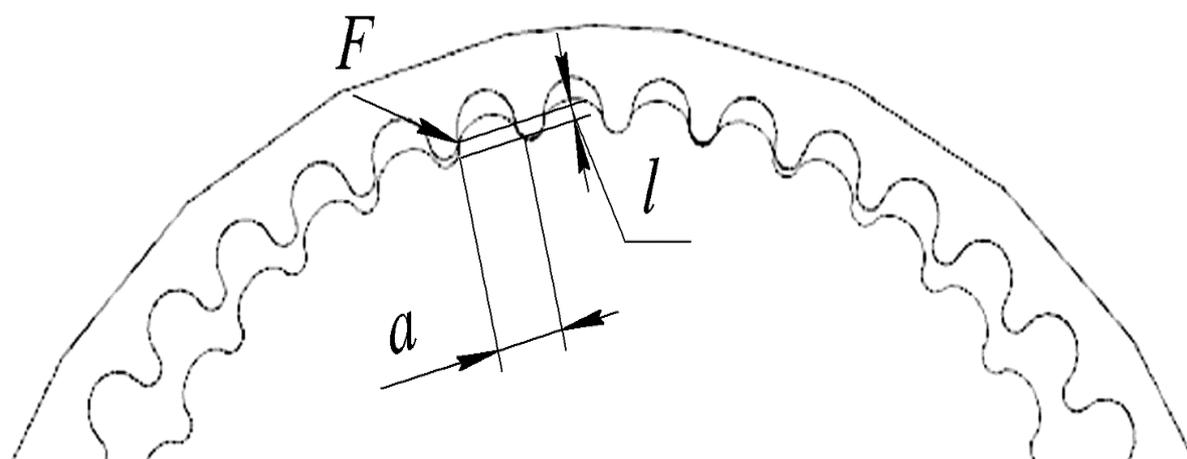
В качестве другого метода повышения деформируемости зубьев сателлита планетарной передачи типа К-Н-V предлагается в центре основания зуба выполнять отверстие, уменьшая таким образом ширину основания зуба.

Используя компьютерное моделирование, определим величину перемещения зубьев под нагрузкой (их деформируемость) с учетом предложенного механизма выравнивания распределения нагрузки между зубьями.

а)



б)



в)

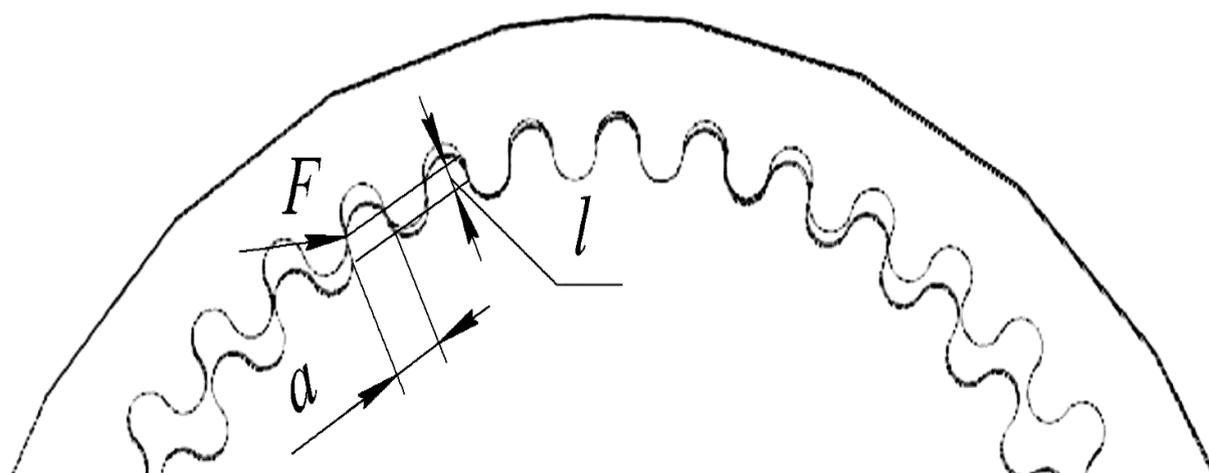


Рис. 1. Схема для определения перемещения вершины зуба сателлита: а – передача с эвольвентным профилем зуба; б – передача с циклоидальным профилем зубьев; в – передача с круговым профилем зубьев

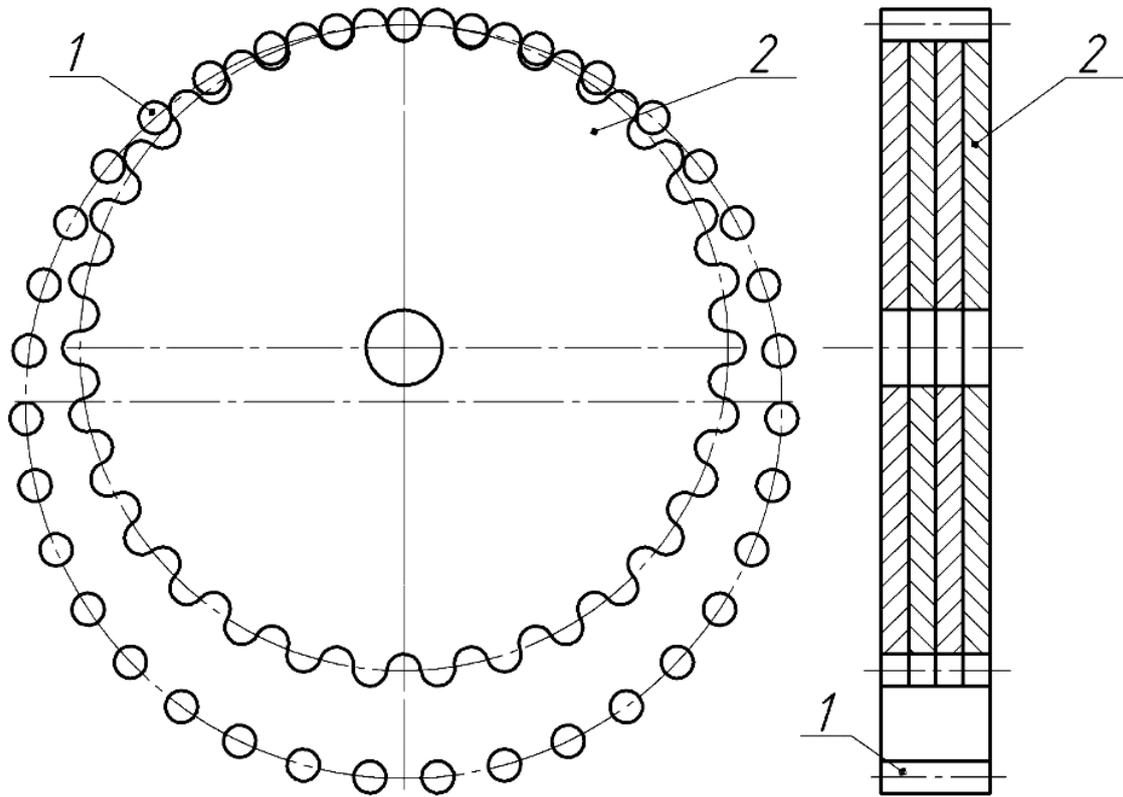


Рис. 2. Конструктивная схема механизма выравнивания распределения нагрузки между телами качения (цевками): 1 – зафиксированное звено (цевки); 2 – сателлит

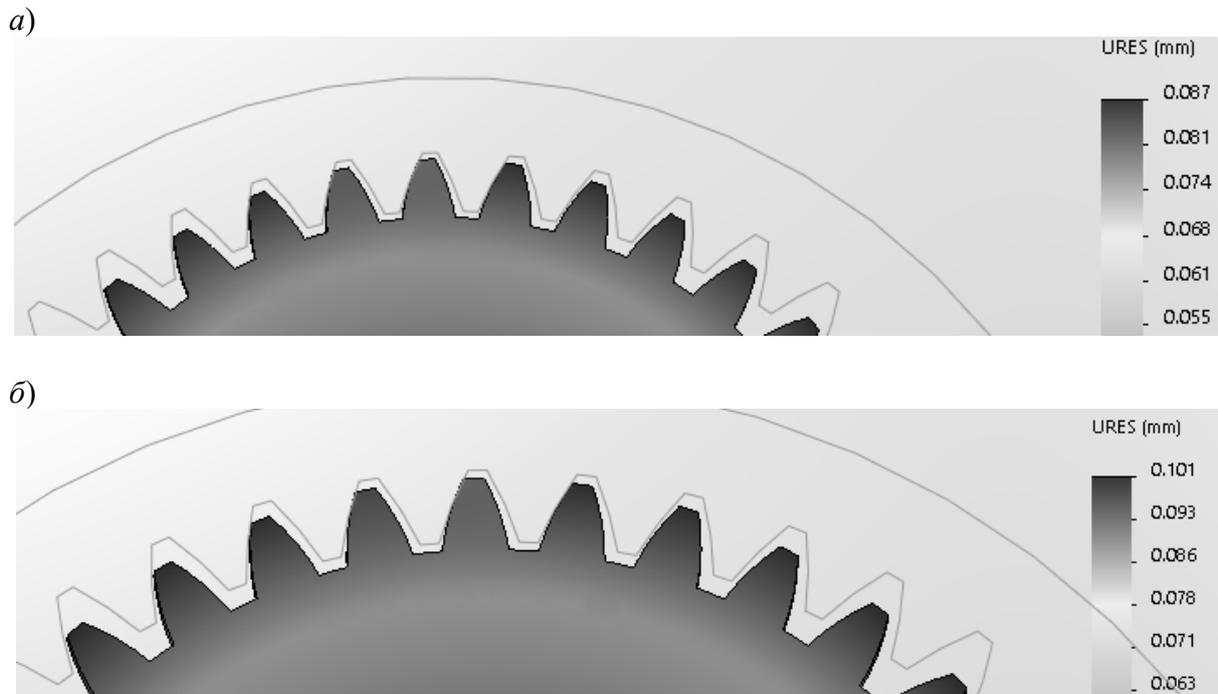


Рис. 3. Результаты компьютерного моделирования передачи с эвольвентным профилем зубьев: а – передача без механизма выравнивания распределения нагрузки; б – передача с предложенным механизмом выравнивания распределения нагрузки

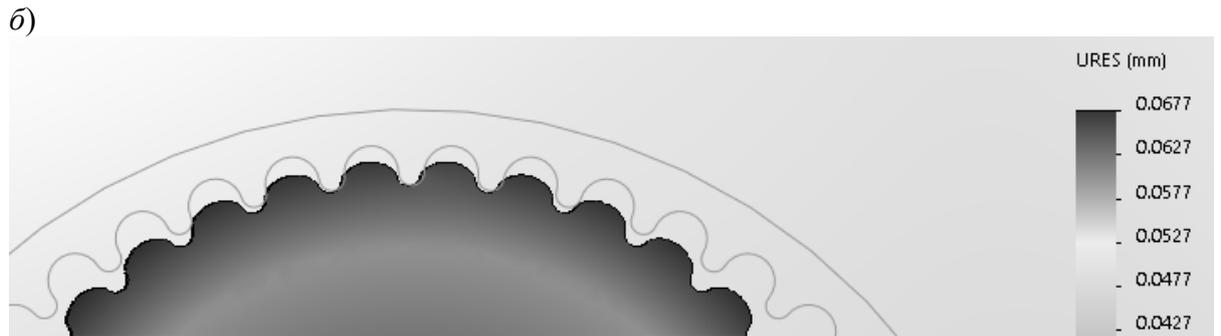
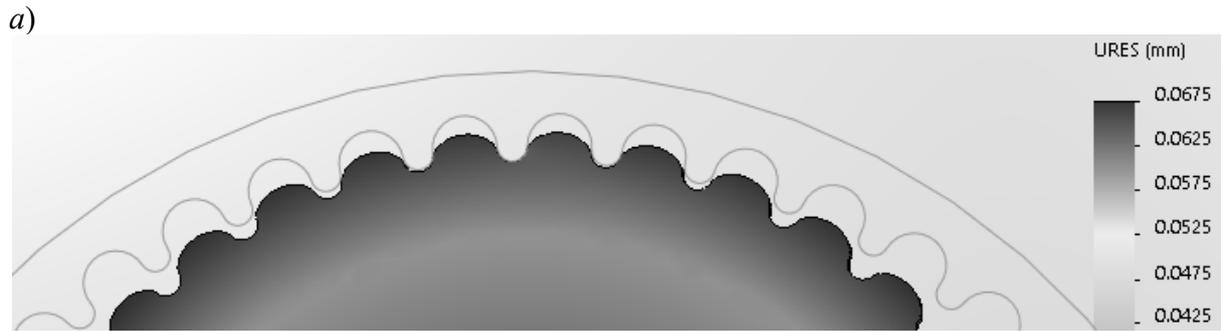


Рис. 4. Результаты компьютерного моделирования передачи с циклоидальным профилем зубьев: *a* – передача без механизма выравнивания распределения нагрузки; *б* – передача с предложенным механизмом выравнивания распределения нагрузки

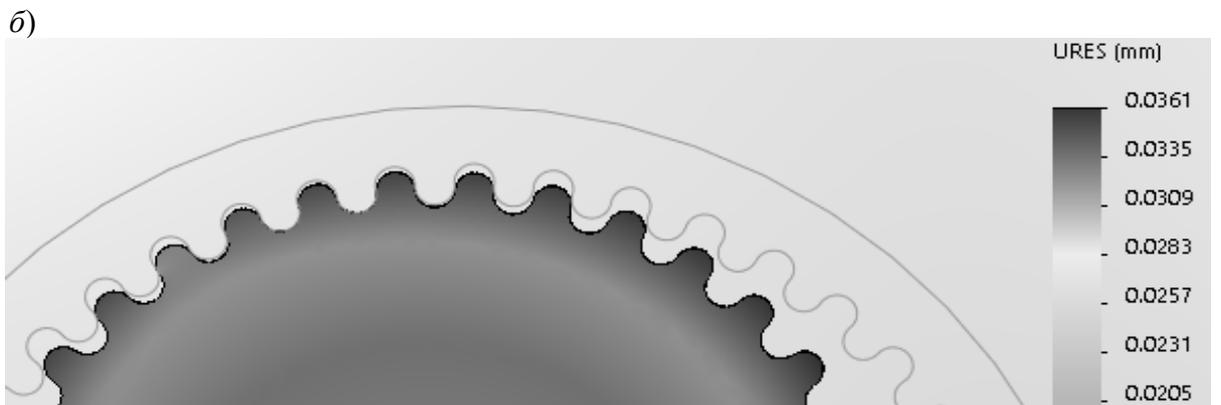
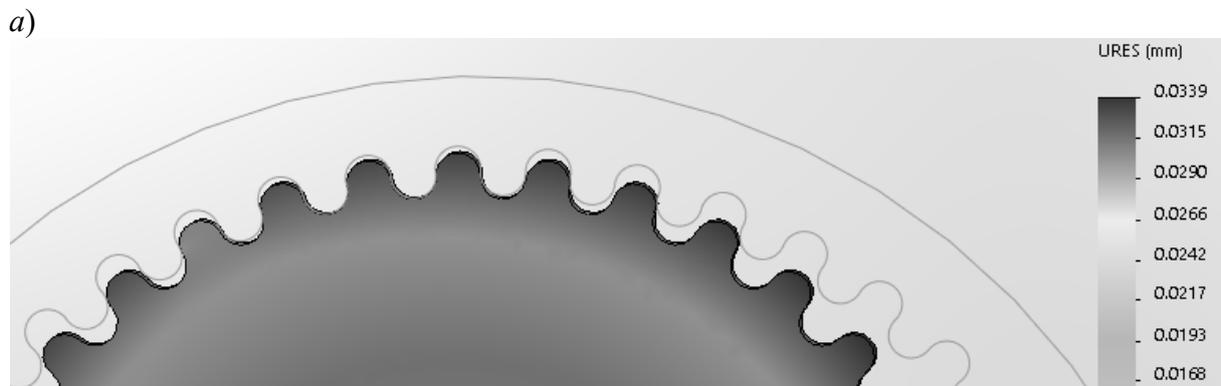


Рис. 5. Результаты компьютерного моделирования передачи с круговым профилем зубьев: *a* – передача без механизма выравнивания распределения нагрузки; *б* – передача с предложенным механизмом выравнивания распределения нагрузки

Определим оптимальную величину диаметра отверстия в центре основания зуба, исходя из следующих критериев:

- в качестве переменной для оптимизации принимаем диаметр отверстия в диапазоне от 1 до 3 мм с шагом 1 мм;
- в качестве ограничения установим, что эквивалентные напряжения, возникающие в зубе, должны быть меньше допусковых;

– цель оптимизации – максимизация величины перемещения зуба под нагрузкой (его деформируемости).

Рассмотрим планетарную цевочную передачу типа К-Н-V с параметрами, принятыми выше (сателлит состоит из одного диска). Вращающий момент на сателлите зададим равным 20 Н·м. Результаты оптимизации приведены на рис. 6.

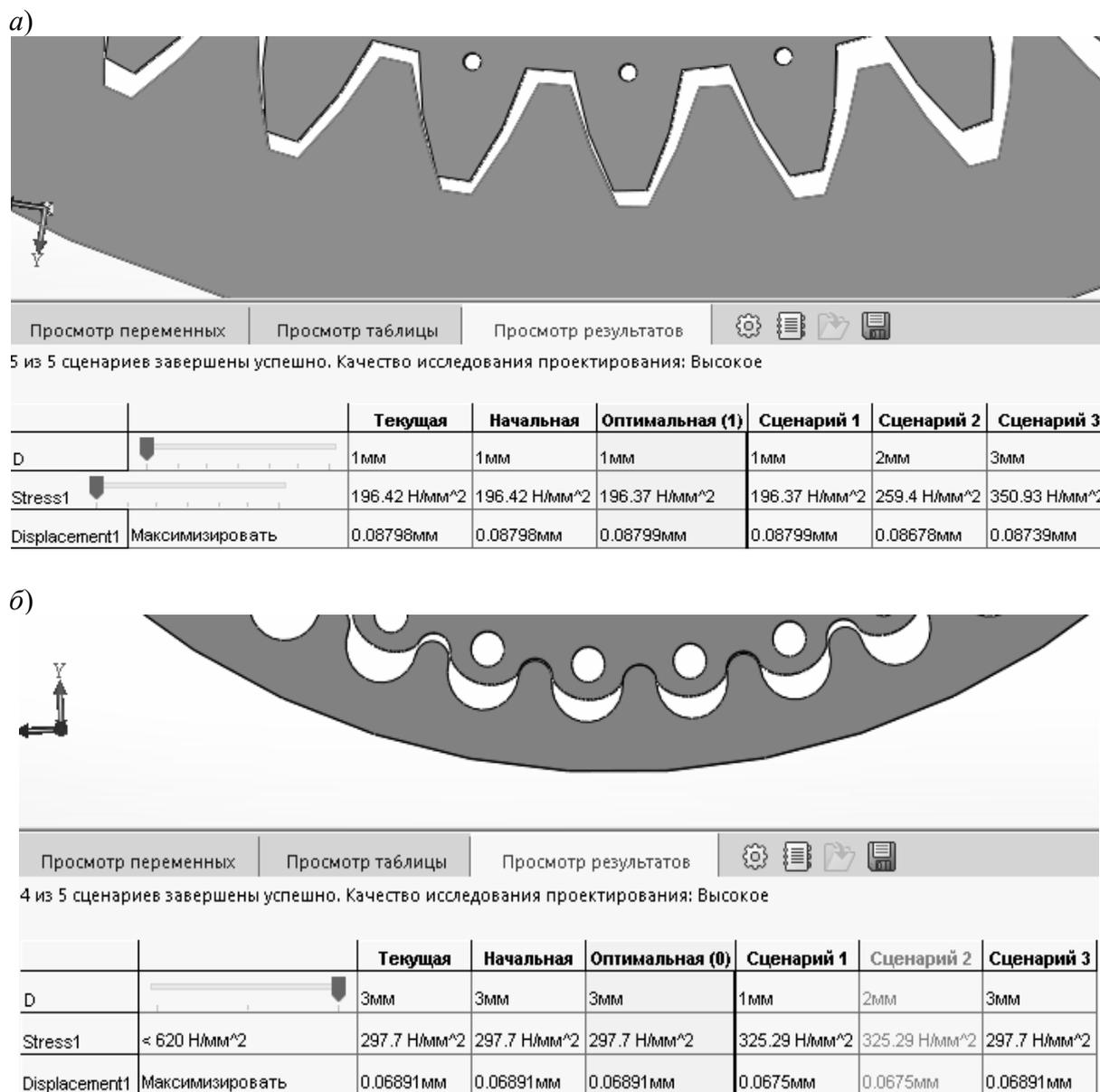


Рис. 6. Результаты оптимизации с использованием предложенного механизма выравнивания распределения нагрузки: а – с эвольвентным профилем зуба; б – с циклоидальным профилем зубьев; в – с круговым профилем зубьев



Окончание рис. 6

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что предложенный механизм выравнивания распределения нагрузки между зубьями работоспособен. Для передачи с рассматриваемыми параметрами с найденными оптимальными значениями предложенного механизма выравнивания распределения нагрузки рост величины перемещения зуба под нагрузкой (его деформируемости) составил:

- для эвольвентного профиля зуба 0,16 %;
- для циклоидального профиля зуба 0,71 %;
- для кругового профиля зуба 4,33 %.

Наибольший эффект от применения предложенного механизма выравнивания распределения нагрузки между зубьями достигнут для передачи с круговым профилем зуба, для остальных видов зацепления эффект незначителен.

Предложенный механизм выравнивания распределения нагрузки (отверстия в центре основания зуба) можно также

использовать для анализа распределения нагрузки вдоль длины зуба (в осевом направлении). Для этого сателлит выполняется в виде набора дисков, при этом в отверстие в основании зуба необходимо установить прутки из пластичного материала (пластик, свинец). Анализ деформации прутка после работы передачи позволит установить картину распределения нагрузки между зубьями по дискам, образующим сателлит.

Для повышения деформируемости под нагрузкой зубьев сателлита планетарной передачи типа К-Н-V и обеспечения выравнивания распределения нагрузки между зубьями также предлагается выполнить отверстия на торце сателлита. Используя компьютерное моделирование в SolidWorks, определим оптимальные величины диаметра отверстий и радиуса окружности, на которой будут располагаться центры отверстий (рис. 7). Параметры планетарной цевочной передачи типа К-Н-V примем аналогичными рассмотренным в предыдущем случае.

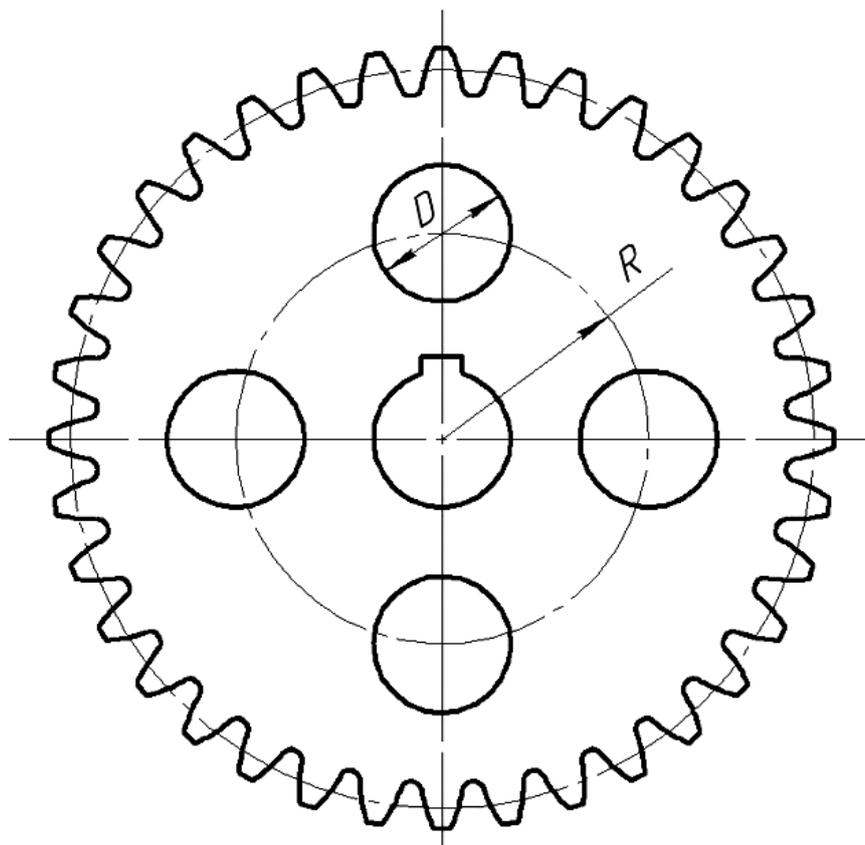


Рис. 7. Схема механизма выравнивания распределения нагрузки между зубьями

Зададим условия оптимизации размеров отверстия на сателлите:

- в качестве переменных для оптимизации принимаем диаметр отверстия в диапазоне от 22 до 30 мм с шагом 2 мм, радиус окружности, на которой будут располагаться центры отверстий, – от 24 до 34 мм с шагом 2 мм;

- количество отверстий – 4;

- в качестве ограничения установим, что эквивалентные напряжения, возникающие в зубе, должны быть меньше допускаемых;

- цель оптимизации – максимизация величины перемещения зуба под нагрузкой (его деформируемости) при минимальных эквивалентных напряжениях.

Результаты оптимизации приведены на рис. 8.

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что предложен-

ный механизм выравнивания распределения нагрузки между зубьями работоспособен. Для передачи с рассматриваемыми параметрами и оптимальными размерами предложенного механизма выравнивания распределения нагрузки рост величины перемещения зуба под нагрузкой (его деформируемости) составил:

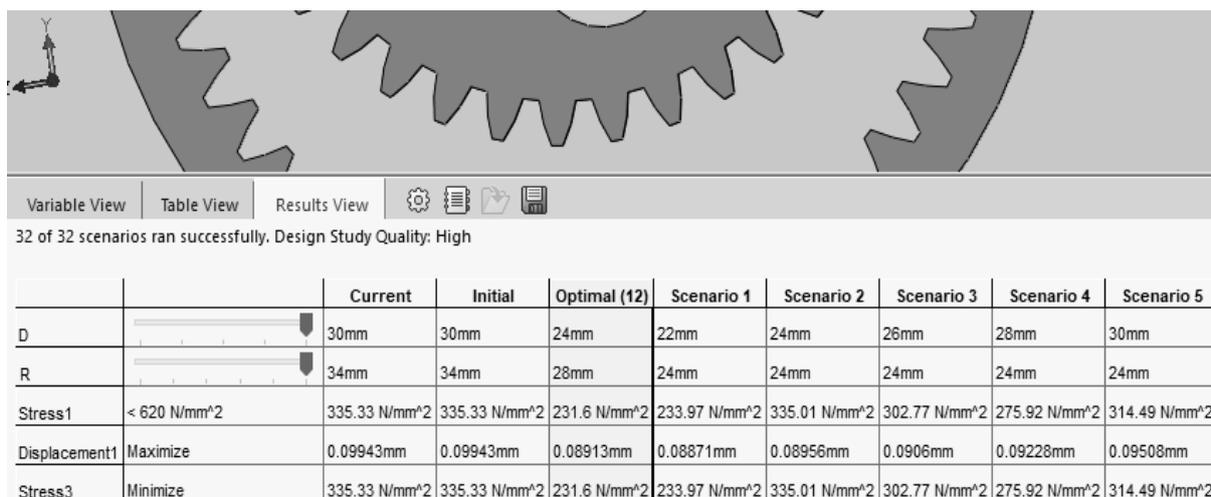
- для эвольвентного профиля зуба 2,92 %;

- для циклоидального профиля зуба 0,73 %;

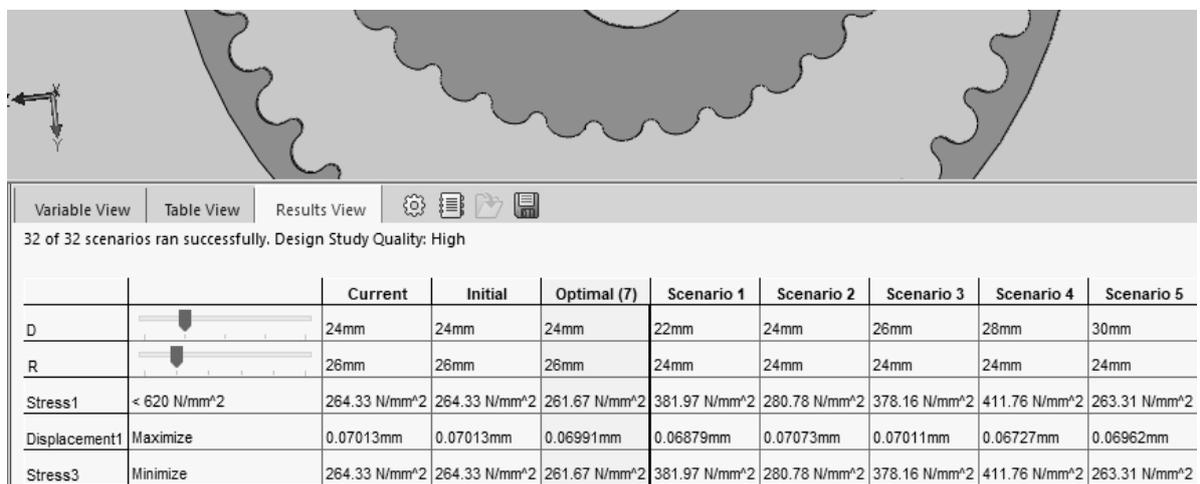
- для кругового профиля зуба 16,28 %.

Наибольший эффект от применения предложенного механизма выравнивания распределения нагрузки между зубьями достигнут для передачи с круговым профилем зуба, для остальных рассмотренных видов зацепления эффект был незначителен.

a)



b)



в)

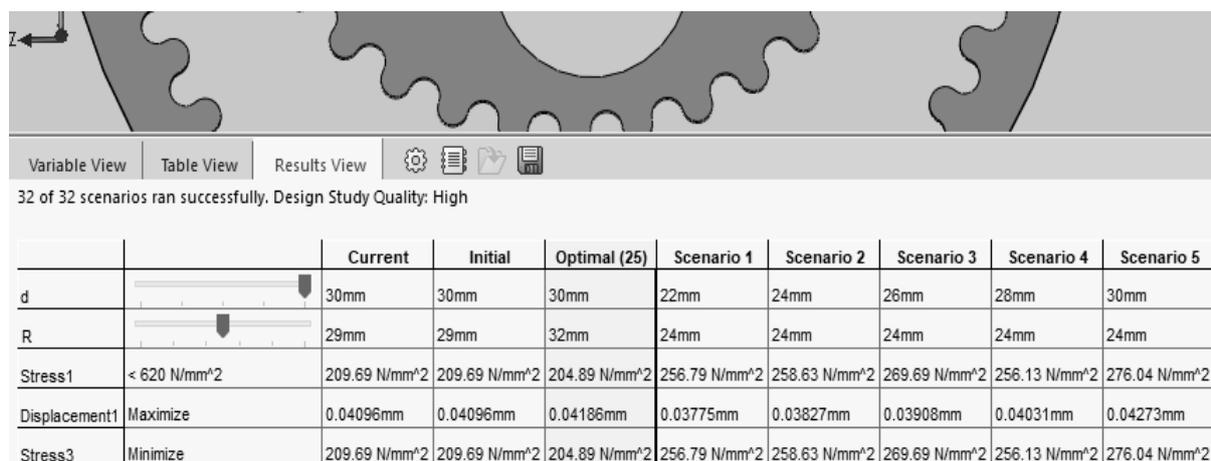


Рис. 8. Результаты оптимизации с использованием предложенного механизма выравнивания распределения нагрузок: а – с эвольвентным профилем зуба; б – с циклоидальным профилем зубьев; в – с круговым профилем зубьев

Таким образом, в результате проведенных исследований разработаны конструктивные схемы механизма выравнивания распределения нагрузки между телами качения (цевками) и получена зависимость перемещения вершины зуба сателлита (его деформируемость). Получены результаты компьютерного моделирования (величины де-

формаций зубьев) планетарной цевочной передачи типа К-Н-V с эвольвентным, циклоидальным и круговым профилями зубьев, подтверждающие работоспособность предложенных механизмов обеспечения равномерного распределения нагрузки между телами качения (цевками).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прудников, А. П. Мультипликатор на базе планетарной зубчатой передачи типа К-Н-V / А. П. Прудников // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 21–22 апр. 2022 г. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – С. 95.

2. Прудников, А. П. Обеспечение равномерного распределения нагрузки в шлицевом соединении / А. П. Прудников // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 21–22 апр. 2022 г. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – С. 96.

Статья сдана в редакцию 2 мая 2023 года

Контакты:
prudnikovar85@gmail.com (Прудников Александр Петрович).

A. P. PRUDNIKOV

MECHANISM FOR LEVELING LOAD DISTRIBUTION BETWEEN ROLLING BODIES OF KHV-TYPE PLANETARY LANTERN GEARING

Abstract

The article deals with the study and development of mechanisms for leveling load distribution between pins in the KHV type planetary gearing with an involute, cycloidal and circular profile of satellite teeth. The analysis of the dependency of displacement of the satellite tooth tip made it possible to determine the factors affecting tooth deformability. The efficiency of the proposed mechanisms for ensuring a uniform distribution of the load between the pins was confirmed by computer simulation of the transmission operation.

Keywords:

planetary gear, pin, load, multiplier.

For citation:

Prudnikov, A. P. Mechanism for leveling load distribution between rolling bodies of KHV-type planetary lantern gearing / A. P. Prudnikov // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 3 (80). – P. 85–94.

DOI: 10.53078/20778481_2023_3_95

УДК 539.21

Н. М. СИМАНОВИЧ¹

О. М. ОСТРИКОВ², канд. физ.-мат. наук

М. П. КУЛЬГЕЙКО², канд. техн. наук, доц.

¹Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого (Гомель, Беларусь)

²Белорусский государственный университет транспорта (Гомель, Беларусь)

ИЗМЕНЕНИЕ КОНФИГУРАЦИИ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБЛАСТИ СЕРПОВИДНОГО ДВОЙНИКА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЙСТВИЯ ВНЕШНЕЙ ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ НАГРУЗКИ

Аннотация

Представлен анализ напряженного состояния в области серповидного двойника, находящегося у поверхности твердого тела в условиях внешнего механического воздействия на поверхность. Рассмотрены варианты изменения конфигурации полей напряжений в зависимости от направления тангенциальной распределенной нагрузки относительно криволинейных двойниковых границ.

Ключевые слова:

деформационное двойникование, серповидный двойник, напряженное состояние, поле напряжений.

Для цитирования:

Симанович, Н. М. Изменение конфигурации полей напряжений в области серповидного двойника в зависимости от направления действия внешней тангенциальной распределенной нагрузки / Н. М. Симанович, О. М. Остриков, М. П. Кульгейко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 3 (80). – С. 95–103.

Введение

Одним из путей повышения надежности и долговечности деталей машин является формирование их рабочих поверхностей с заданными функциональными свойствами. Перспективное направление модификации поверхности представляют многочисленные способы напыления слоя упрочняющего материала, а также другие технологии создания поверхностных пленок. Применение покрытий обеспечивает увеличение износостойкости, контактной прочности, повышение коррозионной стойкости, жаропрочности и других свойств, обеспечивающих работоспособность деталей и узлов в самых неблагоприятных условиях эксплуатации. Качество рабочих поверхностей таких деталей характеризуется совокупностью свойств

сформированной (обработанной) собственно поверхности и слоя материала под ней [1–3].

Упрочняющие покрытия имеют, как правило, резко выраженную границу с основой (подложкой). В связи с этим повышенное внимание уделяется подготовке поверхности подложки для обеспечения адгезии покрытия. Некоторые технологии упрочнения предполагают обработку поверхностного слоя после нанесения покрытия, другие комбинированные способы упрочнения включают предварительную механическую обработку поверхности [2, 3]. В качестве предварительных и окончательных операций обработки поверхности применяются различные методы, в том числе механические способы обработки, например, шлифование, полирование, алмазное выглаживание, виб-

ровыглаживание и др.

Процессы механической обработки обуславливают формирование в поверхностном слое металла дислокационной структуры [4]. Характер этой структуры зависит от многих факторов, в том числе от типа кристаллической решетки, степени пластической деформации, дефектов кристаллического строения и т. д. В двойникующихся материалах в результате тонкого механического воздействия, сопоставимого по степени деформации со скрайбированием поверхности индентором [5], дислокационная структура может проявляться в виде образования механических клиновидных двойников.

Процесс пластической деформации сопровождается возрастанием средней плотности дислокаций, что, в свою очередь, приводит к упрочнению материала, увеличению его твердости, повышению сопротивления пластической деформации, а твердость материала пропорциональна напряжениям, действовавшим в процессе деформации [6]. Повышение уровня прочности металлов происходит как за счет увеличения количества дислокаций, так и в результате их блокировки внутренними дислокационными барьерами, в том числе такими поверхностными дефектами, как скопления дислокаций и двойниковые границы, и другими комбинациями линейных дефектов [4].

Возникающие дислокации создают в кристаллической решетке упругие поля напряжений, которые усиливаются при взаимодействии дислокаций. В результате увеличения количества дислокаций, формирования их скоплений создаются достаточно большие напряжения, которые в совокупности с внешними нагрузками могут приводить к образованию микротрещин [3, 4]. Следовательно, превышение предельной плотности дислокаций в области действия внешнего силового фактора приводит к разрушению материала и выходу избыточных дислокаций в образовавшиеся

микротрещины.

В переходном слое покрытия имеются участки с ослабленными связями – места загрязнений и окисления, поры и т. п. Реальные поверхности всегда имеют дефекты поверхности в виде краевых и винтовых дислокаций как результат сдвига материала [7]. Локализуясь на поверхности, они создают геометрические неоднородности и формируют дислокационный рельеф шероховатости поверхностного слоя.

Дефекты поверхности в подложке по сути являются микротрещинами, способными к распространению при наложении внешних нагрузок и действию остаточных напряжений по механизмам хрупкого или усталостного разрушения. Таким образом, факторы формирования дислокационной структуры двойниковых прослоек и создания полей напряжений от внешнего механического воздействия в совокупности могут привести к образованию микротрещин и разрушению материала.

Если рассматривать процесс скрайбирования [8–10] поверхности индентором как имитацию единичного акта технологического воздействия лезвия режущего инструмента на обрабатываемую поверхность, то представляется возможным оценить результат контактного взаимодействия элементов системы. Принятое сопоставление позволяет на основе аналогии процессов выявить закономерности формирования напряженного состояния в приповерхностной области двойникующегося материала подложки и (или) покрытия.

Механическое двойникование при скрайбировании поверхности индентором характеризуется образованием двойников с криволинейными границами. Особенно ярко это проявляется при перемещении индентора в направлении, отличном от кристаллографического направления кристаллической решетки материала твердого тела [10]. Образование серповидных двойников обусловлено не только дефектами кристалличе-

ской структуры, но и искажениями кристаллической решетки у границ царапины в результате пластической деформации материала под действием перемещающегося индентора [8, 10].

В ранее выполненных исследованиях [11, 12] проведен сравнительный анализ распределения напряжений в области серповидного двойника, находящегося у поверхности твердого тела под действием нормальной распределенной нагрузки, в сопоставлении с двойником с прямолинейными границами. В связи с актуальностью обозначенных в работе задач представляет практический интерес установить характер изменения полей напряжений вдоль границ серповидных двойников при касательном внешнем воздействии различного направления.

Целью работы является определение полей напряжений в области серпо-

видного двойника, находящегося у поверхности твердого тела, при перемене направления воздействия распределенной тангенциальной нагрузки.

Постановка задачи и методика ее решения

На рис.1 схематично представлен серповидный двойник длиной L и шириной H у устья с криволинейными границами, одна из которых выпуклая, описываемая функцией $f_1(y_0)$, другая – вогнутая, описываемая функцией $f_2(y_0)$:

$$y = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{\pi}{2L}x\right);$$

$$y = -\frac{H}{2}\left(\frac{x}{L}-1\right)^2.$$

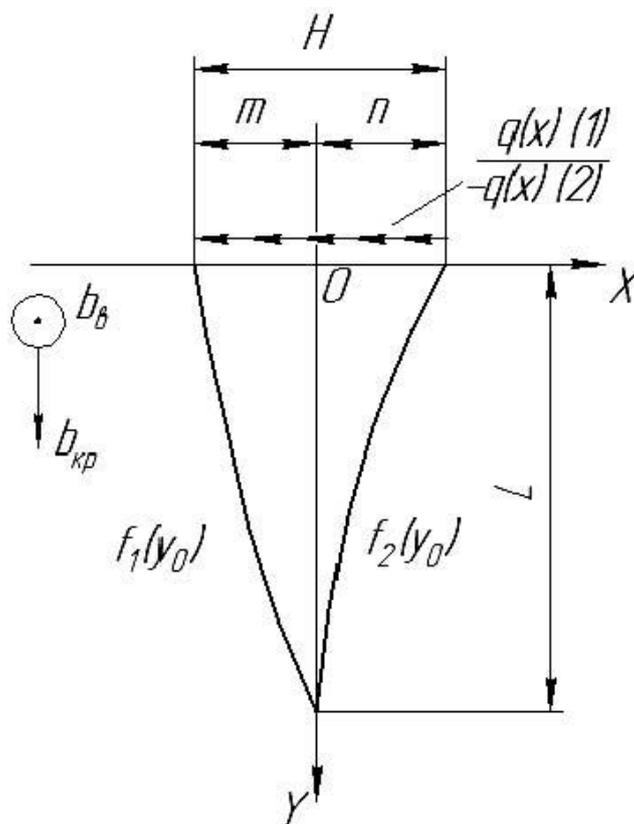


Рис. 1. Схематическое изображение двойника с изменением (1) и (2) направления действия тангенциальной распределенной нагрузки

На участке поверхности $(-m \leq x \leq n)$ в области двойника действует касательная распределенная нагрузка $q(x)$. При этом рассмотрим два варианта: в первом варианте – внешнее воздействие направлено в сторону выпуклой границы двойника, во втором – в сторону вогнутой границы, т. е. при действии $-q(x)$.

Результирующее напряжение в области двойника определяется в соответствии с принципом суперпозиции как сумма напряжений от двойника и внешнего усилия [13], т. е.

$$\sigma_{ij}^{\text{с}}(x, y) = \sigma_{ij}^{\text{дс}}(x, y) + \sigma_{ij}^{\text{п}}(x, y),$$

где $\sigma_{ij}^{\text{дс}}(x, y)$ – напряжения, создаваемые двойником; $\sigma_{ij}^{\text{п}}(x, y)$ – напряжения от внешней равномерно распределенной на участке касательной нагрузки.

Расчет напряженного состояния в области двойника и определение конфигурации полей напряжений осуществлялись по методике [14, 15]. Принимая во внимание выводы [16] о том, что наиболее существенное влияние поверхности на конфигурацию полей напряжений оказывается в случае скалывающих напряжений, расчеты выполняются на примере распределения величины сдвиговой компоненты σ_{xy} тензора напряжений.

Результаты и их обсуждение

Так как поставленная задача решается в соответствии с принципом суперпозиции, вначале проведен анализ распределения полей напряжений у серповидного двойника при отсутствии внешней нагрузки и поля напряжений, создаваемых внешним силовым воздействием при отсутствии двойника (рис. 2 и 3).

На рис. 2 представлено распределение сдвиговых напряжений у серповидного двойника при отсутствии

внешней нагрузки. Поле напряжений при удалении от двойниковых границ в целом принимает симметричную конфигурацию относительно плоскости двойникования. Вблизи и вдоль границ двойника наблюдается достаточно выраженная асимметрия полей напряжений. Существенная разница в интенсивности проявления напряжений отмечается на двойниковых границах. На вогнутой границе – максимум у устья, падение отрицательных напряжений до нуля на глубине $2/3$ длины двойника и возрастание положительных напряжений к вершине; на выпуклой границе – менее интенсивное падение напряжений от устья к середине двойника и повышенная концентрация ближе к его вершине.

В области вогнутой границы меньшие напряжения создаются в приповерхностном слое на глубине около $1/4$ длины двойника. Вблизи выпуклой границы в приповерхностной области и справа от вершины формируются большие напряжения по абсолютной величине по сравнению с областью вогнутой границы. Максимальная концентрация напряжений достигается в вершине двойника (положительные напряжения) и у поверхности на границах, а также внутри двойниковой прослойки (отрицательные напряжения).

Действие тангенциальной распределенной нагрузки создает симметричное по абсолютным значениям поле напряжений (см. рис. 3). Относительно нулевой линии в направлении действия нагрузки знак напряжений меняется с плюса на минус, т. е. слева имеют место напряжения растяжения, а справа – сжатия. Максимальная концентрация напряжений отмечается на границах действия распределенной нагрузки. Так как эти границы совпадают с двойниковыми границами, то на данных участках следует ожидать значительной концентрации напряжений, а следовательно, с учетом их знака существенного увеличения или уменьшения результирующих напряжений.

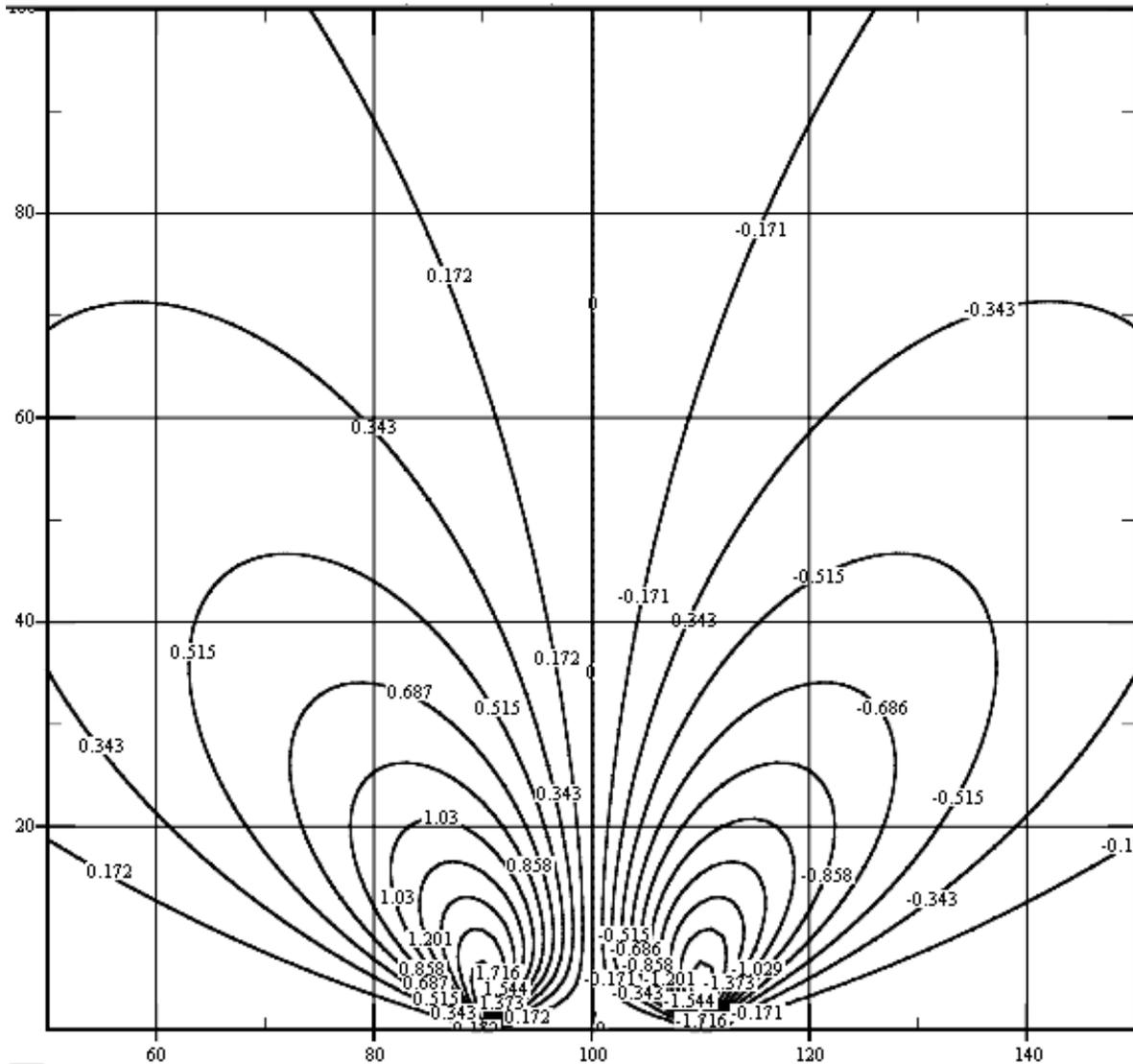


Рис. 3. Поле напряжений при действии на поверхности тангенциальной распределенной нагрузки

Действие касательной нагрузки обратного направления, т. е. в сторону вогнутой границы двойника, усиливает сжимающие напряжения вдоль вогнутой границы и ослабляет действие напряжений вдоль выпуклой границы, создавая поле растягивающих напряжений справа от этой границы (рис. 5). Максимальные отрицательные напряжения ($-2,17$ МПа) создаются у устья вогнутой границы, а положительные ($+1,33$ МПа) – у устья выпуклой грани-

цы. Так же, как и в предыдущем случае, т. е. независимо от направления действия внешней нагрузки, значительные напряжения возникают внутри двойниковой прослойки, особенно у поверхности, а в вершине двойника снижается ($\sim 10\%$) действие растягивающих напряжений. В целом при изменении направления действия внешней касательной нагрузки конфигурация полей напряжений меняется на противоположную в отношении знака напряжений.

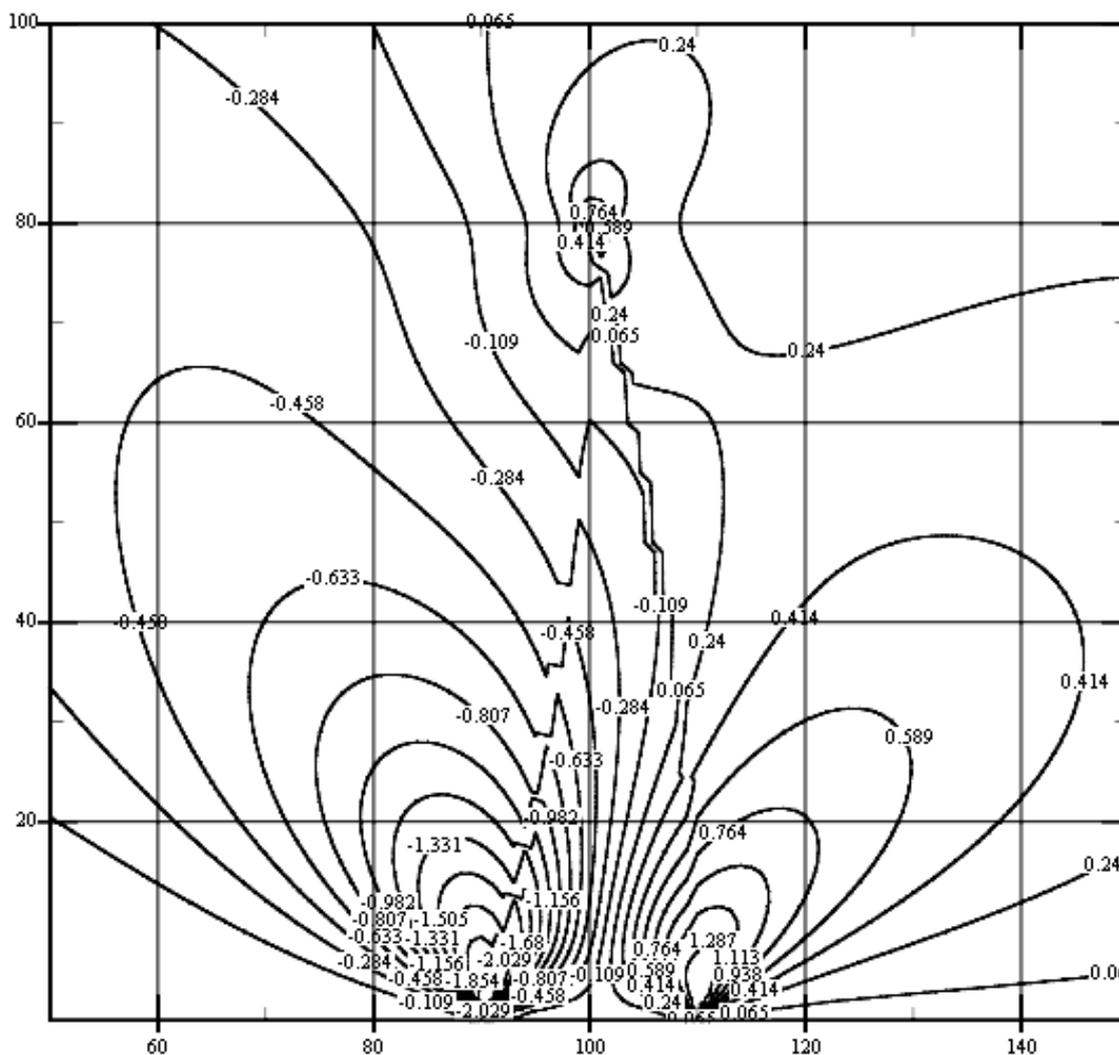


Рис. 5. Напряжения у серповидного двойника при действии на поверхности касательной нагрузки в направлении вогнутой границы

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Восстановление деталей машин: справочник / Ф. И. Пантелеенко [и др.]. – Москва: Машиностроение, 2003. – 672 с.
2. Обработка и упрочнение поверхностей при изготовлении и восстановлении деталей / В. И. Бородавко [и др.]; под общ. ред. М. Л. Хейфеца, С. А. Клименко. – Минск: Беларуская навука, 2013. – 464 с.
3. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами / А. Г. Бойцов [и др.]. – Москва: Машиностроение, 1991. – 144 с.
4. Старков, В. К. Физика и оптимизация резания материалов / В. К. Старков. – Москва: Машиностроение, 2009. – 640 с.
5. Симанович, Н. М. Влияние скорости скрайбирования на особенности формирования двойников в монокристалле висмута / Н. М. Симанович, О. М. Остриков, М. П. Кульгейко // Вестн. Магілёўскага ўніверсітэта імя А. А. Куляшова. – 2018. – № 2 (52). – С. 87–97.
6. Дель, Г. Д. Технологическая механика / Г. Д. Дель. – Москва: Машиностроение, 1978. – 174 с.
7. Григорьев, А. Я. Физика и микрогеометрия технических поверхностей / А. Я. Григорьев. – Минск: Беларуская навука, 2016. – 247 с.
8. Кульгейко, Н. М. Особенности двойникования монокристалла висмута при скрайбировании его поверхности (111) индентором Виккерса / Н. М. Кульгейко, О. М. Остриков // Вестн. ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2015. – № 2 (61). – С. 42–50.

9. **Кульгейко, Н. М.** Закономерности образования двойников у границ царапины при скрайбировании поверхности (111) монокристалла висмута индентором Виккерса / Н. М. Кульгейко, О. М. Остриков // Вестн. Магілёў. дзярж. ун-та імя А. А. Куляшова. – 2016. – № 1 (47). – С. 74–81.

10. **Симанович, Н. М.** Влияние направления скрайбирования на формирование двойниковых ансамблей в монокристалле висмута / Н. М. Симанович, О. М. Остриков, М. П. Кульгейко // Вестн. БрГТУ. Машиностроение. – 2017. – № 4 (106). – С. 51–54.

11. **Симанович, Н. М.** Поля напряжений в области расположенного у поверхности серповидного двойника, к которому приложена распределенная нагрузка / Н. М. Симанович, О. М. Остриков, М. П. Кульгейко // Механика. Исследования и инновации. – 2022. – Вып. 15. – С. 214–220.

12. **Симанович, Н. М.** Особенности полей напряжений в области двойника серповидной формы, находящегося у поверхности твердого тела / Н. М. Симанович, О. М. Остриков, М. П. Кульгейко // Современные проблемы машиноведения: сб. науч. тр.: в 2 ч. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2023. – Ч. 2. – С. 230–233.

13. **Остриков, О. М.** Механика двойникования твердых тел: монография / О. М. Остриков. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008. – 301 с.

14. **Остриков, О. М.** Методика прогнозирования распределения полей напряжений в реальных кристаллах с остаточными некогерентными двойниками / О. М. Остриков. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – 278 с.

15. **Джонсон, К.** Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – Москва: Мир, 1989. – 510 с.

16. **Остриков, О. М.** Роль поверхности в формировании напряженного состояния у клиновидного нанодвойника / О. М. Остриков // Вестн. ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2012. – № 3. – С. 49–18.

Статья сдана в редакцию 1 июня 2023 года

Контакты:

nataliasimoniha1991@gmail.com (Симанович Наталья Михайловна);

omostrikov@mail.ru (Остриков Олег Михайлович);

kulgeyko82@rambler.ru (Кульгейко Михаил Петрович).

N. M. SIMANOVICH, O. M. OSTRIKOV, M. P. KULGEYKO

CHANGING THE CONFIGURATION OF STRESS FIELDS IN THE CRESCENT-SHAPED TWIN REGION DEPENDING ON THE DIRECTION OF EXTERNAL TANGENTIAL DISTRIBUTED LOAD ACTION

Abstract

An analysis of the stress state in the region of a crescent-shaped twin located near the surface of a solid body under conditions of external mechanical action on the surface is presented. Variants of changing the configuration of stress fields depending on the direction of a tangential distributed load relative to curvilinear twin boundaries are considered.

Keywords:

deformation twinning, crescent-shaped twin, stress state, stress fields.

For citation:

Simanovich, N. M. Changing the configuration of stress fields in the crescent-shaped twin region depending on the direction of external tangential distributed load action / N. M. Simanovich, O. M. Ostrikov, M. P. Kulgeyko // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 3 (80). – P. 95–103.

DOI: 10.53078/20778481_2023_3_104

УДК 629.113

В. П. ТАРАСИК, *д-р техн. наук, проф.*

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ОЦЕНКИ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ КАРЬЕРНОГО САМОСВАЛА

Аннотация

Изложена методика определения вероятностных характеристик процессов функционирования механизмов гидромеханической трансмиссии карьерного самосвала с имитацией реальных эксплуатационных условий, предназначенная для применения на стадии проектирования. Полученные вероятностные характеристики нагрузок использовались при проектировании планетарной коробки передач карьерного самосвала.

Ключевые слова:

карьерный самосвал, гидромеханическая трансмиссия, планетарная коробка передач, вероятностные характеристики, математическое ожидание, дисперсия, гистограмма распределения вероятностей.

Для цитирования:

Тарасик, В. П. Вероятностные оценки процессов функционирования гидромеханической трансмиссии карьерного самосвала / В. П. Тарасик // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 3 (80). – С. 104–114.

Для карьерного самосвала БелАЗ грузоподъемностью 60 т создана новая гидромеханическая передача (ГМП) с планетарной коробкой передач (ПКП). Кинематическая схема ПКП приведена в [1]. Она выполнена с тремя степенями свободы и обеспечивает шесть передач переднего хода.

Для оценки возможности достижения планируемого ресурса ПКП необходимо располагать характеристиками нагруженности её механизмов. При проектировании ПКП получение требуемых характеристик осуществлялось на основе математического моделирования процессов функционирования механизмов ГМП с имитацией её работы в карьерных условиях. Использовалось описание характеристик дорожных условий в двух карьерах, существенно различающихся глубиной и уклонами дороги: карьер «Гранит» (г. п. Микашевичи, Брестская обл., Республика Беларусь) и карьер «Ерунаковский» (г. Новокузнецк, Кемеровская обл., Российская Федерация). Параметры характеристик дорожных усло-

вий выбранных карьеров приведены в [2].

Микропрофиль опорной поверхности карьерных дорог описывался случайными функциями и представлял собой случайный процесс, поэтому исследуемые процессы функционирования и нагружения механизмов ГМП были также случайными.

В результате моделирования получены характеристики нагружения основных элементов конструкции ГМП: зубчатых колес и фрикционов ПКП, карданных валов трансмиссии, вращающих моментов двигателя и гидротрансформатора, а также мощности двигателя, частоты вращения его вала и расхода топлива. Информация о результатах моделирования приведена в виде графиков и таблиц в [2, 4]. В качестве примера на рис. 1 представлены графики изменения во времени вращающих моментов на карданном валу трансмиссии самосвала $M_{к.в}$ при движении в карьере «Гранит» (а) и в карьере «Ерунаковский» (б).

При проведении анализа процес-

сов функционирования исследуемых механизмов выполнялось определение оценок их вероятностных характеристик – дисперсий, корреляционных

функций, спектральных плотностей, а также характеристик плотности вероятности оцениваемых параметров [3].

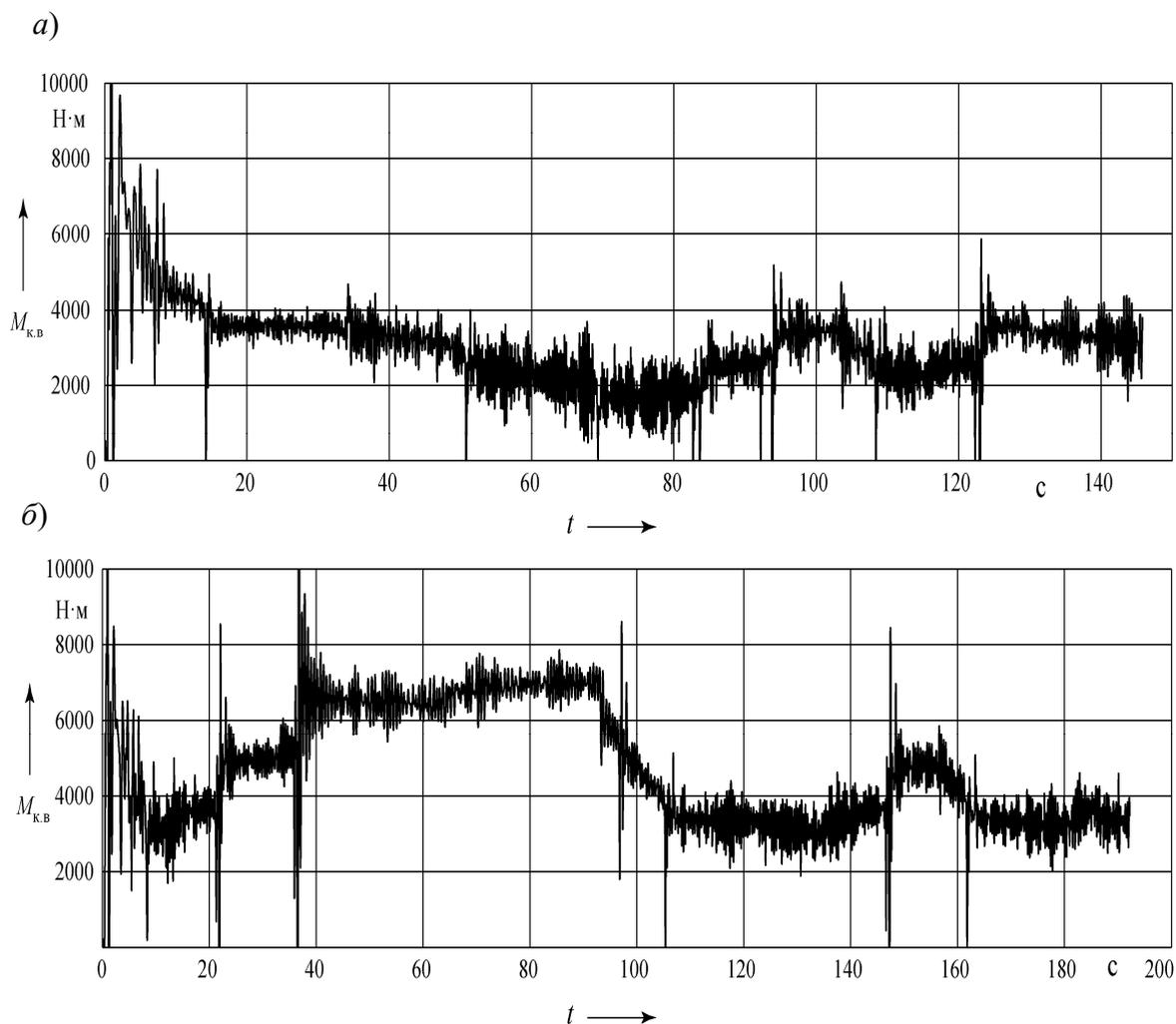


Рис. 1. Графики изменения во времени моментов нагрузки на карданном валу трансмиссии самосвала при движении в карьере «Гранит» (а) и в карьере «Ерунаковский» (б)

При вычислении статистических оценок характеристик случайных процессов необходимо вначале определить шаг дискретизации независимой переменной (времени t) и объем выборки N . Шаг дискретизации Δt выбирают с учетом внутренней структуры случайного процесса, а объем выборки зависит от характера процесса и определяет необходимую точность статистических оценок [3]. На основе теоремы Котельникова – Шеннона о квантовании непрерыв-

ных сигналов был принят шаг дискретизации $\Delta t = 0,05$ с, а объем выборки $N = 2000$.

Для оценки плотности вероятности случайного процесса $x(t)$ используется массив чисел, составляющих его реализацию. Вначале необходимо произвести группирование данных массива. Для этого вся область изменения выборки от x_{\min} до x_{\max} разбивается на $k_{\text{гр}}$ интервалов одинаковой длины Δx

и подсчитывается число элементов выборки $n_j, j = \overline{1, k_{\text{Гр}}}$, попавших в каждый интервал. Значениям x , находящимся в одном и том же интервале j , присваивается значение \bar{x}_j , соответствующее середине данного интервала.

Для определения количества интервалов группирования $k_{\text{Гр}}$ используют различные полуэмпирические выражения. Одно из них имеет вид

$$k_{\text{Гр}} = 1 + 3,2 \lg N. \quad (1)$$

Полученное значение $k_{\text{Гр}}$ округляют в сторону ближайшего целого числа. После выбора $k_{\text{Гр}}$ определяют длину интервала:

$$\Delta x = (x_{\text{max}} - x_{\text{min}}) / k_{\text{Гр}}. \quad (2)$$

Схема процесса группирования элементов выборки случайного процесса $x(t)$ представлена на рис. 2.

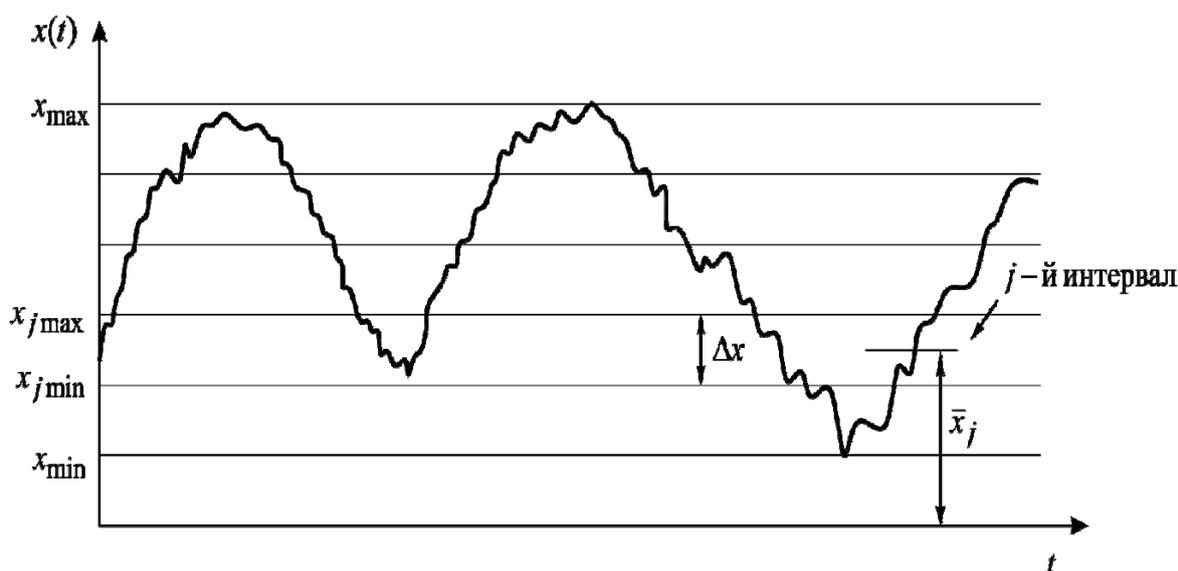


Рис. 2. Схема процесса группирования элементов выборки случайного процесса $x(t)$

Сгруппированные данные используются для определения эмпирической функции $\hat{f}_N(j\Delta x)$, являющейся оценкой $\hat{f}_N(x)$ плотности вероятности $f(x)$ случайного процесса $x(t)$ в точках $j = \overline{1, k_{\text{Гр}}}$, соответствующих серединам

интервалов Δx :

$$\hat{f}_N(j\Delta x) = \frac{n(j\Delta x)}{N\Delta x} = \frac{v_j}{\Delta x}, \quad (3)$$

где

$$n(j\Delta x) = \begin{cases} n_j, & \text{если } x_j \text{ попадает в } j\text{-й интервал;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (4)$$

Графическое изображение функции $\hat{f}_N(x)$ называют *гистограммой*. Для построения гистограммы на оси абсцисс откладывают границы интервалов и для каждого интервала строят прямоугольник с высотой, равной $n_j/(N\Delta x)$. Сумма площадей всех прямоугольников равна 1. Отношение n_j/N называют *относительной частотой* (или *частотью*) и обозначают v_j . Частость v_j является несмещенной состоятельной оценкой \hat{P}_j для вероятности P_j попадания реализаций случайного процесса $x_i, i = \overline{1, N}$, в j -й интервал группирования [3].

На основе изложенной методики определим оценки плотности вероятности

$\hat{f}(M_{к.в})$ вращающего момента карданного вала $M_{к.в}$ гидромеханической трансмиссии исследуемого самосвала. Для этого используем выборки случайных процессов $M_{к.в}(t)$, полученные в двух различных карьерах, графики которых представлены на рис. 1, а, б.

На рис. 3, а приведена гистограмма распределения вращающего момента $M_{к.в}$ при работе самосвала в условиях карьера «Гранит», а на рис. 3, б – в карьере «Ерунаковский». По оси абсцисс отложены значения исследуемого случайного процесса $M_{к.в}(t)$, а по оси ординат – оценки плотности вероятности его распределения по выделенным интервалам процесса.

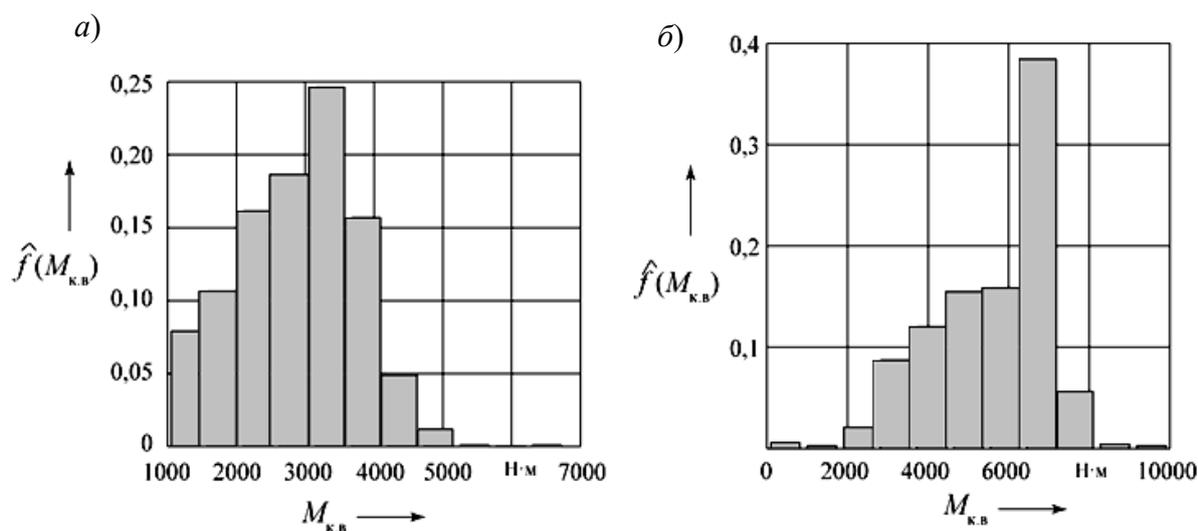


Рис. 3. Гистограммы распределения момента на карданном валу трансмиссии самосвала при движении в карьере «Гранит» (а) и в карьере «Ерунаковский» (б)

Сравнивая приведенные гистограммы, можно отметить, что величина момента $M_{к.в}$ в условиях карьера «Гранит» находится в основном в пределах 1000...4000 Н·м, максимальные значения не превышают 6500 Н·м, а в условиях карьера «Ерунаковский» наибольшая вероятность момента сосредото-

чена в диапазоне 3000...8000 Н·м, максимальное значение достигает 10000 Н·м. Следовательно, нагруженность механизмов трансмиссии автомобиля во втором карьере существенно выше, чем в первом.

Аналогичные вероятностные оценки определены для вращающего момен-

та M_d и мощности P_d двигателя самосвала. На рис. 4, а, б приведены гистограммы распределения момента $\hat{f}(M_d)$ и мощности $\hat{f}(P_d)$ двигателя при движении в условиях карьера «Гранит», а на рис. 4, в, г – в условиях карье-

ра «Ерунаковский». Очевидно, что условия работы двигателя значительно меньше зависят от параметров характеристик маршрутов движения по сравнению с влиянием их на нагрузки трансмиссии.

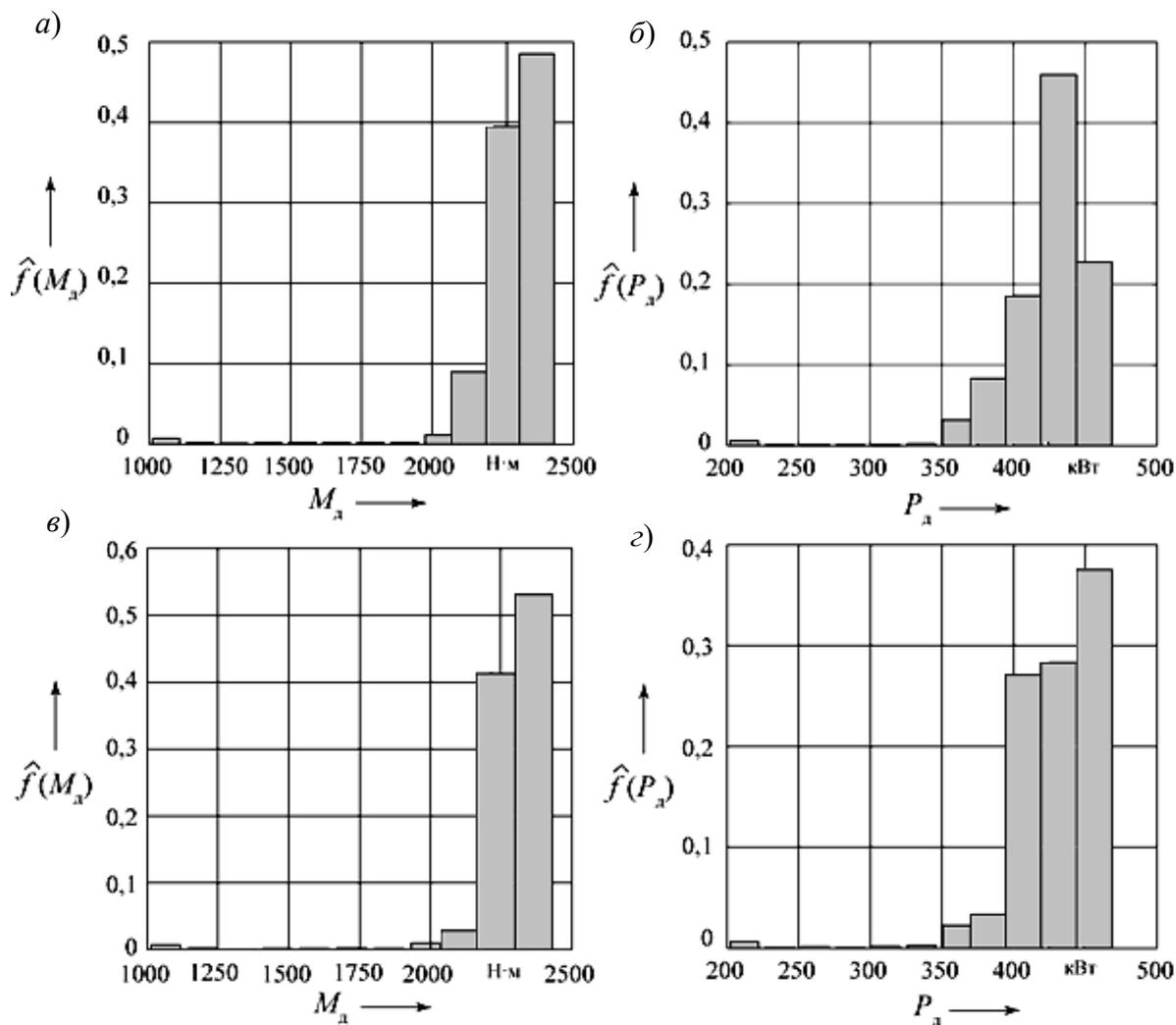


Рис. 4. Гистограммы распределения момента M_d и мощности P_d двигателя при движении самосвала в карьере «Гранит» (а, б) и в карьере «Ерунаковский» (в, г)

Из рис. 1, а, б видно, что исследуемые случайные процессы $M_{к.в} = f(t)$ не стационарны. Это обусловлено значительными изменениями детерминированной составляющей дорожного сопротивления, определяемой продоль-

ными уклонами участков маршрута. Поэтому при вероятностном анализе этих случайных процессов необходимо выделить текущие значения их математических ожиданий (текущие средние) и осуществить их центрирование.

Обозначим реализацию исследуемого случайного процесса $x(t)$, текущее значение математического ожидания $\bar{x}(t)$, а центрированную составляющую $\overset{\circ}{x}(t)$. Тогда

$$x(t) = \bar{x}(t) + \overset{\circ}{x}(t). \quad (5)$$

Для выделения $\bar{x}(t)$ используем фильтр В. С. Пугачёва (рис. 5), имеющий следующую характеристику [3]:

$$h(n_i) = \begin{cases} 1 & \text{при } |n_i| \leq 0,5n_\Phi; \\ 0 & \text{при } |n_i| > 0,5n_\Phi, \end{cases} \quad (6)$$

где n_Φ – количество ординат случайного процесса, используемых для вычисления j -го значения $\bar{x}_j(t)$; n_i – порядковые номера текущих ординат в интервале от $-0,5n_\Phi$ до $+0,5n_\Phi$, покрываемых фильтром.

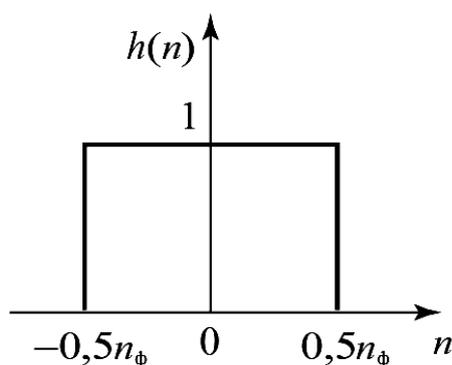


Рис. 5. Характеристика фильтра В. С. Пугачёва

Значение текущего среднего $\bar{x}_j(t)$ можно найти по формуле

$$\bar{x}_j(t) = \frac{1}{n_\Phi + 1} \sum_{i=-0,5n_\Phi}^{0,5n_\Phi} h(n_i)x_{j+i}, \quad (7)$$

$j = \overline{1, N}$.

При определении $\bar{x}(t)$ используется объем выборки N^* , отличающийся от объема N величиной n_Φ : $N^* = N - n_\Phi$, т.е. первые n_Φ значений выборки не используются. При трогании автомобиля с места и на начальном этапе разгона наблюдаются значительные кратковременные пиковые выбросы момента (см. рис. 1). Их также желательно не использовать при определении вероятностных характеристик, т.к. на началь-

ном участке реализации текущее среднее будет вычисляться со значительной погрешностью. Поэтому ординаты начального участка длительностью 5 с не использовались для определения $\bar{x}(t)$ и $\overset{\circ}{x}(t)$. Длительность реализации исследуемых случайных процессов T , необходимая для получения их вероятностных характеристик, вычисляется по формуле

$$T = N\Delta t. \quad (8)$$

В данном случае $T = 100$ с.

На основе изложенной методики, используя дискретные значения ординат исследуемых случайных процессов $M_{к.в.}$, M_d , P_d , n_d и др., были определены их текущие средние и получены ординаты центрированных составляю-

ших $M_{к.в}$, M_d , P_d , n_d . На рис. 6, а приведены графики, иллюстрирующие выделение текущего среднего значения момента на карданном валу $\bar{M}_{к.в}(t)$ (изображено сплошной жирной линией), а на рис. 6, б – его центрированной составляющей $\overset{\circ}{M}_{к.в}(t)$. Очевидно, что

последняя представляет собой стационарный случайный процесс. На характеристики двигателя существенное влияние оказывают переходные процессы при переключении передач, что затрудняет приведение их к стационарному виду при оценке вероятностных характеристик.

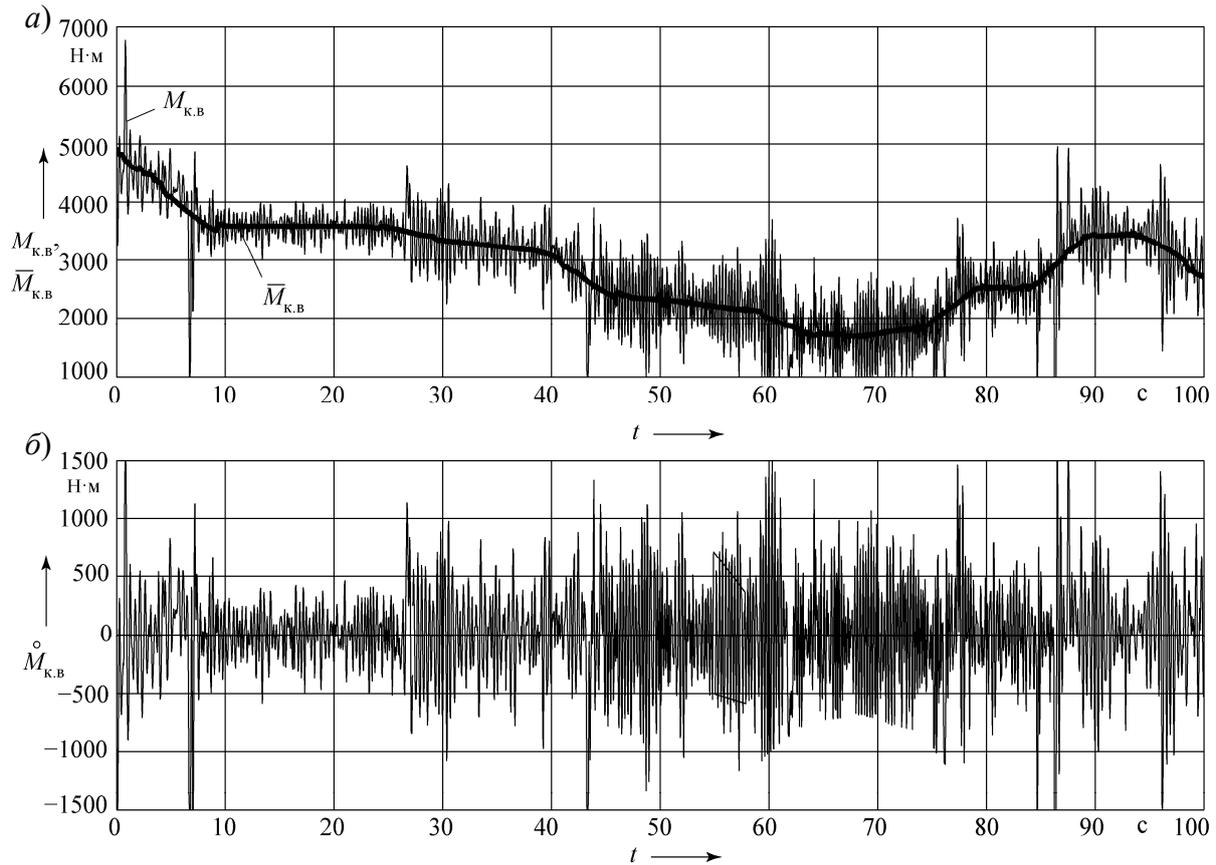


Рис. 6. Графики, отображающие выделение текущего среднего значения момента $\bar{M}_{к.в}(t)$ на карданном валу (а) и его центрированной составляющей $\overset{\circ}{M}_{к.в}(t)$ (б)

В табл. 1 приведены значения оценок математических ожиданий \bar{x} и дисперсий D_x исследованных процессов $M_{к.в}$, M_d , P_d , n_d при движении самосвала по маршруту. Среднее значение нагруженности валов трансмиссии в карьере «Ерунаковский» в 1,5 раза выше, чем в карьере «Гранит», а дисперсия

момента на карданном валу выше более чем в 2 раза. Использование мощности двигателя в обоих случаях примерно одинаково, но дисперсия M_d и P_d выше в карьере «Гранит», что обусловлено более легкими дорожными условиями. Это хорошо видно также из сопоставления графиков на рис. 4, а–г.

Табл. 1. Значения оценок числовых вероятностных характеристик исследованных случайных процессов

Карьер	Обозначение оценки	Значение по исходным ординатам				Значение по центрированным ординатам			
		$M_{к.в}$	n_d	M_d	P_d	$\overset{\circ}{M}_{к.в}$	$\overset{\circ}{n}_d$	$\overset{\circ}{M}_d$	$\overset{\circ}{P}_d$
«Гранит»	\bar{x}	$3,064 \cdot 10^3$	$1,756 \cdot 10^3$	$2,293 \cdot 10^3$	$4,212 \cdot 10^2$	1,132	-1,605	10,764	0,748
	D_x	$1,275 \cdot 10^6$	$3,615 \cdot 10^4$	$5,225 \cdot 10^4$	$1,882 \cdot 10^3$	$2,061 \cdot 10^5$	$5,868 \cdot 10^3$	$7,058 \cdot 10^3$	$6,862 \cdot 10^2$
«Ерунаковский»	\bar{x}	$4,693 \cdot 10^3$	$1,784 \cdot 10^3$	$2,290 \cdot 10^3$	$4,273 \cdot 10^2$	-0,543	1,349	7,776	1,363
	D_x	$2,613 \cdot 10^6$	$2,963 \cdot 10^4$	$4,229 \cdot 10^4$	$1,537 \cdot 10^3$	$3,767 \cdot 10^5$	$6,314 \cdot 10^3$	$4,023 \cdot 10^3$	$2,489 \cdot 10^2$

Одной из важнейших характеристик случайного процесса является корреляционная функция $R_x(\tau)$. Эта функция характеризует степень линейной связи (корреляцию) между значениями случайного процесса в различные моменты времени. Для дискретного случайного процесса $x(t)$ корреляционную функцию вычисляют по формуле [3]

$$R_x(\tau) = \frac{1}{N-n} \sum_{i=1}^{N-n} x_i x_{i+n}, \quad (9)$$

где τ – аргумент корреляционной функции – временной сдвиг, $\tau = n\Delta t$; $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ – число, определяющее величину сдвига по оси абсцисс; Δt – шаг дискретизации независимой переменной (времени).

При $n = 0$ получаем оценку дисперсии случайного процесса $R_x(0) = D_x$. Значение $R_x(\tau)$ при этом максимально. С увеличением сдвига τ значение $R_x(\tau)$ уменьшается. При некотором значении $\tau = \tau_0$ график $R_x(\tau)$ пересекает ось абсцисс. Это значение называют временем корреляции. При $\tau > \tau_0$ случайные значения функции $x(t)$ практически независимы друг от друга.

Для сравнения корреляционных функций случайного процесса, получаемых в различных условиях эксплуатации машины, удобно использовать

нормированную корреляционную функцию $\rho_x(\tau)$, определяемую из соотношения

$$\rho_x(\tau) = \frac{R_x(\tau)}{D_x}. \quad (10)$$

Нормированная корреляционная функция $\rho_x(\tau)$ безразмерная, максимальное ее значение равно единице. Это создает удобства для сравнительного анализа получаемых результатов эксперимента.

На рис. 7, а приведены графики нормированной корреляционной функции момента на карданном валу $\rho_{M_{к.в}}(\tau)$. График 1 соответствует карьере «Гранит», а график 2 – карьере «Ерунаковский». Эти графики позволяют исследовать структуру случайного процесса и определить период низкочастотных колебаний. На основе графиков $R_{M_{к.в}}(\tau)$ можно получить графики спектральной плотности момента на карданном валу $G_{M_{к.в}}(\omega)$.

Спектральная плотность характеризует распределение дисперсии случайного процесса по частоте ω , т. е. аргументом спектральной плотности является круговая частота ω , рад/с (или циклическая частота ν , Гц). При использовании корреляционной функции для получения спектральной плотности необходимо иметь в виду, что с увели-

чением аргумента τ возрастает погрешность корреляционной функции, что может привести к существенному искажению графика спектральной плотности. Поэтому для получения оценки

спектральной плотности случайного процесса применяют сглаживание корреляционной функции посредством корреляционного окна.

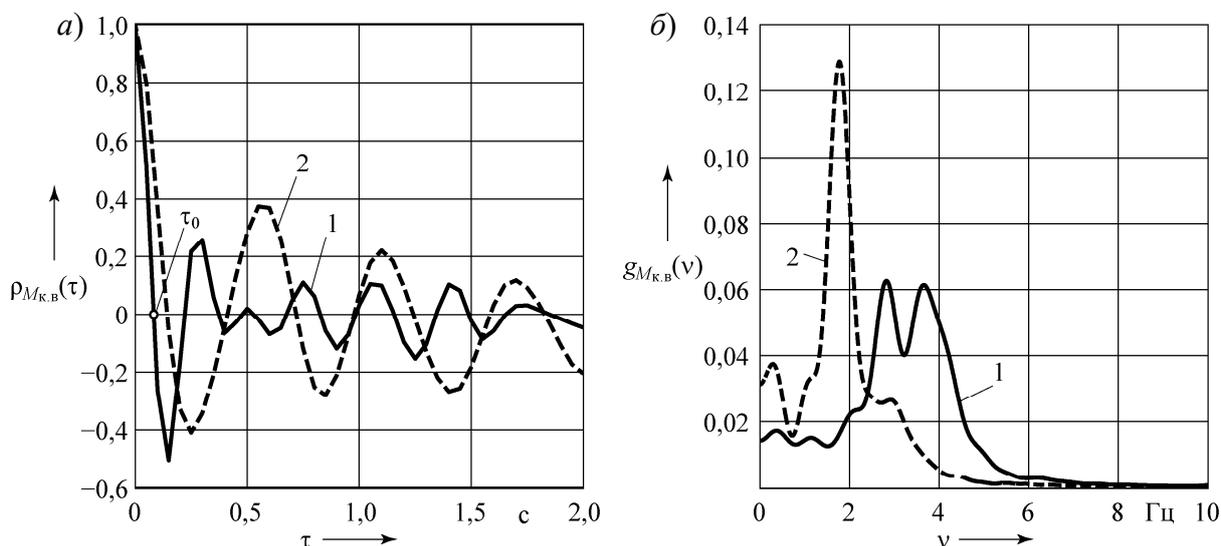


Рис. 7. Графики нормированных корреляционной функции (а) и спектральной плотности (б): 1 – карьер «Гранит»; 2 – карьер «Ерунаковский»

Сглаживание представляет собой такую же фильтрацию ординат функции $R_x(\tau)$, как и фильтрация ординат реализации случайного процесса $x(t)$ низкочастотным фильтром $h(n_i)$. Существует несколько функций сглаживания корреляционной функции [3].

В данном случае была использована функция Бартлета (рис. 8), которая имеет вид

$$h(\tau) = \begin{cases} 1 - |\tau|/\tau_{\max} & \text{при } |\tau| \leq \tau_{\max}; \\ 0 & \text{при } |\tau| > \tau_{\max}. \end{cases} \quad (11)$$

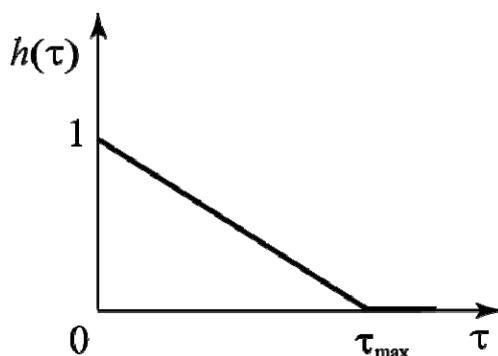


Рис. 8. График функции корреляционного окна Бартлета

Для дискретных случайных процессов $x(t)$ спектральная плотность $G_x(\omega)$

$$G_x(\omega) = G_x(j\Delta\omega) = \frac{\Delta\tau}{\pi} \left[R_x(0) + 2 \sum_{i=1}^{n_{\max}} R_x(i\Delta\tau) h(i\Delta\tau) \cos(j\Delta\omega) i\Delta\tau \right], \quad (12)$$

где $\Delta\omega$ – шаг дискретизации аргумента ω спектральной плотности $G_x(\omega)$; j – номер точки дискретного аргумента ω_j , $\omega_j = j\Delta\omega$; $j = 0, 1, 2, 3, \dots, k$; $\Delta\tau = \Delta t$; $n_{\max} = \tau_{\max} / \Delta t$.

Для сравнения результатов экспериментальных исследований автомобиля в различных условиях эксплуатации удобно использовать нормированную спектральную плотность $g_x(\omega)$, вычисляемую из соотношения

$$g_x(\omega) = \frac{G_x(\omega)}{D_x}. \quad (13)$$

Нормированная спектральная плотность – безразмерная функция. На рис. 7, б приведены графики нормированных спектральных плотностей момента на карданном валу $g_{M_{к.в}}(\nu)$, соответствующие графикам нормированных корреляционных функций $\rho_{M_{к.в}}(\tau)$, представленным на рис. 7, а. В качестве аргумента функций спектральных плотностей на рис. 7, б вместо ω использована циклическая частота $\nu = \omega / (2\pi)$, Гц.

Рассмотрим графики функций $\rho_{M_{к.в}}(\tau)$ и $g_{M_{к.в}}(\nu)$. Корреляционная функция момента на карданном валу имеет затухающий колебательный характер. Из рис. 7, а видно, что частота колебаний этой функции, соответствующая условиям движения в карьере «Гранит», значительно выше, чем в карьере «Ерунаковский». На графике 1 нормированной спектральной плотности $g_{M_{к.в}}(\nu)$, полученной для карьера «Гранит», выявлены два значитель-

вычисляется по формуле [3]

ных пика дисперсий при частотах 2,83 и 3,67 Гц. При движении в карьере «Ерунаковский» (график 2) пиковое значение дисперсии момента на карданном валу соответствует частоте 1,75 Гц. Причем дисперсия момента в этом случае в 2 раза выше, чем в первом. Это обусловлено существенными различиями характеристик рассматриваемых карьеров, что сказывается на режимах движения самосвала и нагружения механизмов трансмиссии. Изменения частоты колебаний обусловлены различием резонансных частот масс трансмиссии при движении на разных передачах. Так, в карьере «Гранит» автомобиль в исследуемом интервале времени движется на IV, V и VI передачах, а в карьере «Ерунаковский» – на II и III передачах. Дисперсия колебаний момента на карданном валу в трансмиссии в основном сосредоточена в диапазоне частоты до 6 Гц.

Таким образом, функция спектральной плотности позволяет выявить резонансные частоты колебаний исследуемых процессов объекта проектирования, определить дисперсии максимальных моментов нагрузок и осуществить обоснованный выбор параметров, обеспечивающих надежное функционирование объекта проектирования.

Время корреляции τ_0 ординат момента на карданном валу также связано со спектром резонансных частот трансмиссии. С увеличением частоты колебаний момента значение τ_0 снижается (см. рис. 7, а).

Полученные характеристики распределения плотности вероятностей, математических ожиданий и дисперсий вероятностных процессов функциони-

рования механизмов самосвала в реальных дорожных условиях использовались затем при проектировании планетарной коробки передач, входящей в состав гидромеханической трансмиссии самосвала.

Использование вероятностных ха-

рактеристик позволило существенно повысить достоверность информации о нагрузках механизмов объекта проектирования, что в результате обеспечит надежность их функционирования в реальных условиях эксплуатации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диагностирование гидромеханических передач: монография / Н. Н. Горбатенко [и др.]; под ред. В. П. Тарасика. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2010. – 511 с.
2. Прогнозирование нагруженности механизмов гидромеханической трансмиссии карьерного самосвала на основе математического моделирования / В. П. Тарасик [и др.] // Грузовик. – 2013. – № 6. – С. 24–36.
3. **Тарасик, В. П.** Математическое моделирование технических систем : учебник / В. П. Тарасик. – Минск : Новое знание; Москва : ИНФРА-М, 2016. – 592 с.
4. **Тарасик, В. П.** Моделирование нагрузочных режимов гидромеханической трансмиссии карьерного самосвала / В. П. Тарасик // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2023. – № 2. – С. 75–86.

Статья сдана в редакцию 9 июня 2023 года

Контакты:

avtobru@gmail.com (Тарасик Владимир Петрович).

V. P. TARASIK

PROBABILISTIC EVALUATION OF PROCESSES RELATED TO FUNCTIONING OF THE HYDROMECHANICAL TRANSMISSION OF MINING DUMP TRUCKS

Abstract

The paper presents a technique for determining probabilistic characteristics of processes related to functioning of mechanisms of hydromechanical transmission in mining dump trucks with the imitation of real operating conditions to be used at the design stage. The resulting probabilistic load characteristics were used when designing a planetary gearbox for a mining dump truck.

Keywords:

mining dump truck, hydromechanical transmission, planetary gearbox, probabilistic characteristics, mathematical expectation, variance, probability distribution histogram.

For citation:

Tarasik, V. P. Probabilistic evaluation of processes related to functioning of the hydromechanical transmission of mining dump trucks / V. P. Tarasik // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 3 (80). – P. 104–114.

DOI: 10.53078/20778481_2023_3_115

УДК 621.9.047:669:538.8

В. М. ШЕМЕНКОВ¹, канд. техн. наук, доц.

М. А. РАБЫКО¹

В. В. ШЕМЕНКОВ²

¹Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь)

ВЛИЯНИЕ ПРИКАТОДНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА УПРОЧНЕНИЯ ТЛЕЮЩИМ РАЗРЯДОМ ШТАМПОВОЙ СТАЛИ 4Х4ВМФС

Аннотация

Представлены результаты исследования микротвердости, износостойкости, структуры и фазового состава образцов из штамповой стали 4Х4ВМФС после классической закалки и подвергнувшейся обработке тлеющим разрядом как с магнитным полем, так и без него.

Ключевые слова:

тлеющий разряд, микротвердость, износостойкость, структура, фазовый состав, модифицирующая обработка, поверхностный слой, сталь.

Для цитирования:

Шеменков, В. М. Влияние прикатодного магнитного поля на эффективность процесса упрочнения тлеющим разрядом штамповой стали 4Х4ВМФС / В. М. Шеменков, М. А. Рабыко, В. В. Шеменков // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 3 (80). – С. 115–125.

Введение

Штамповые стали для горячей обработки давлением, такие как сталь 4Х4ВМФС и ее заменители, предназначены для работы в условиях интенсивного ударного и термоциклического нагружения. От них требуется сложный, иногда взаимоисключающий, комплекс эксплуатационных и технологических свойств, таких как прочность, износостойкость, вязкость и прокаливаемость, а также теплостойкость, окалиностойкость и разгаростойкость.

Благодаря комплексному легированию вольфрамом и молибденом сталь 4Х4ВМФС имеет более высокую вязкость, что способствует повышению разгаростойкости и теплостойкости до 600 °С.

Сталь близка по составу и видам превращений при термической обработке к быстрорежущим сталям, однако

является доэвтектоидной с меньшим содержанием карбидов типа $M_{23}C_6$ и M_6C . Хром в составе стали обеспечивает достаточно хорошую окалино- и износостойкость.

Сталь 4Х4ВМФС – одна из основных сталей в отечественной промышленности при изготовлении пресс-форм литья под давлением и штамповой оснастки, испытывающих периодический нагрев, охлаждение поверхности и объемное воздействие нагретого металла.

Представлены результаты исследований, которые являются логическим продолжением ранее опубликованной работы авторов [4].

Целью данной работы являлось изучение влияния прикатодного магнитного поля на степень упрочнения образцов, изготовленных из штамповой стали 4Х4ВМФС, их износостойкость и структурно-фазовое состояние в поверхностном слое.

В рамках работы исследования проводились на образцах размером $10 \times 20 \times 10$ мм из стали 4Х4ВМФС ГОСТ 5950–2000 промышленной плавки, прошедших классическую термическую обработку, заключающуюся в закалке с 1130 °С на масло с последующим отпуском при 550 °С в течение 2 ч, что, как правило, для данной стали приводит к выделению высокодисперсных карбидов [1].

Методика исследования

В работе применялись растровая электронная микроскопия и рентгеновский структурный анализ для исследования структуры и фазового состава стали. Для определения твердости поверхностного слоя использовался дюрометрический метод по Виккерсу, износостойкость определялась по принципу сухого трения образца и контртела. Методика проведения указанных исследований

аналогична методике, описанной в [2, 3].

Для определения глубины упрочненного слоя образцы подвергались разрезанию по плоскости, перпендикулярной упрочняемой поверхности (плоскость разреза).

Обработка образцов тлеющим разрядом так же, как и в [2–4], осуществлялась по трем основным режимам, соответствующим режимам обработки стали Х12МФ [4]. Время обработки по всем режимам составило 30 мин.

Результаты исследования и их обсуждение

На основании растровой электронной микроскопии поверхностного слоя образцов по плоскости разреза выявлено, что структура стали 4Х4ВМФС после термической обработки соответствует классической мартенситной структуре (рис. 1, а).

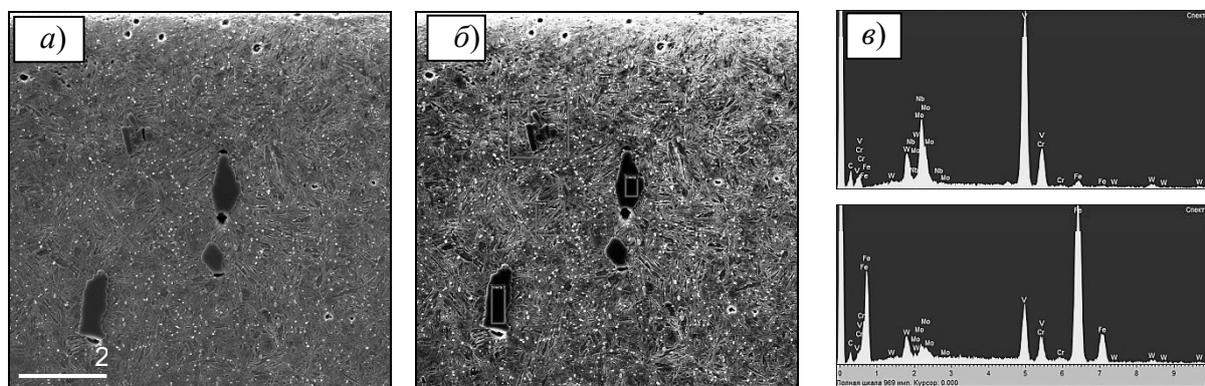


Рис. 1. Структура поверхностного слоя образцов из стали 4Х4ВМФС: а – до обработки тлеющим разрядом; б – электронное изображение структуры с участками анализа; в – рентгеновские спектры от участков образца

Большое количество карбидообразующих элементов, таких как хром (Cr), ванадий (V) и вольфрам (W), в сочетании с высоким содержанием углерода способствуют образованию большого количества как тугоплавких карбидов, так и различных карбидов хрома (рис. 1, б, в).

Как можно увидеть, карбидные

частицы имеют сложную вытянутую форму, что характерно для металла, подвергнутого пластическому деформированию. Средняя площадь карбидных включений составляет $35 \dots 40$ $\mu\text{м}^2$.

Обработка тлеющим разрядом приводит к перераспределению карбидной фазы в поверхностном слое глубиной до 50 $\mu\text{м}$ (рис. 2).

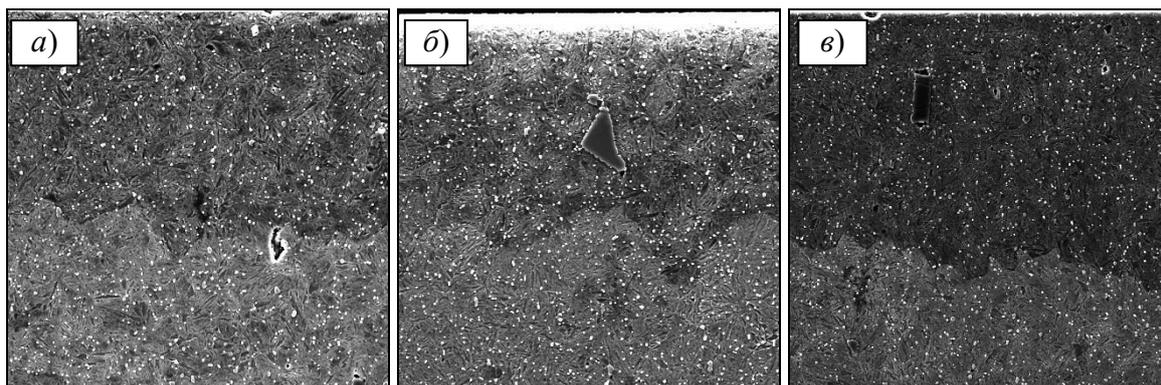


Рис. 2. Структура поверхностного слоя образцов из стали 4X4VMFC, обработанных тлеющим разрядом: а – после обработки по режиму № 1; б – после обработки по режиму № 2; в – после обработки по режиму № 3

Применение прикатодного магнитного поля при обработке тлеющим разрядом приводит к увеличению глубины модифицированного слоя до 80 мкм (рис. 3). Структура поверхностного слоя имеет два ярко выраженных участка, отличающихся между со-

бой фазовыми контрастами, причем величина первого составляет 20...25 мкм. Данная особенность может быть объяснена интенсивностью теплового воздействия на упрочняемую поверхность в процессе обработки.

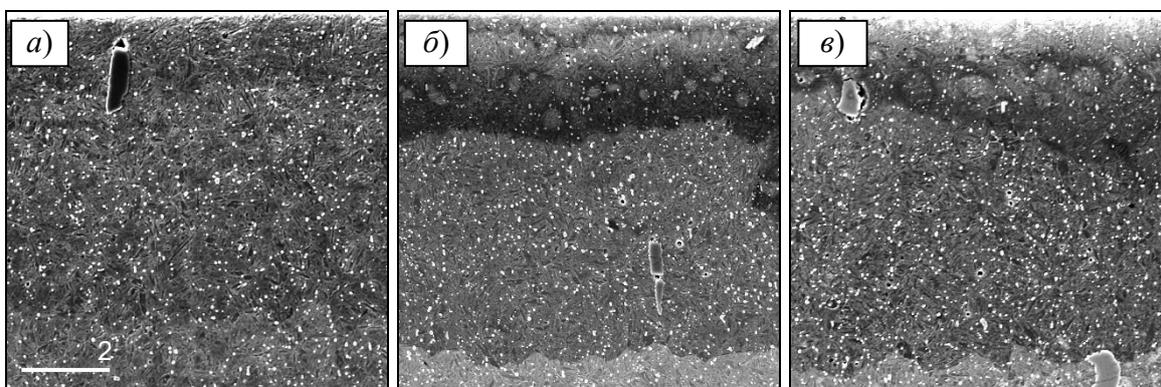


Рис. 3. Структура поверхностного слоя образцов из стали 4X4VMFC после обработки тлеющим разрядом с использованием прикатодного магнитного поля: а – после обработки по режиму № 1; б – после обработки по режиму № 2; в – после обработки по режиму № 3

Рентгеноструктурный анализ образцов в исходном состоянии выявил, что сталь 4X4VMFC содержит мартенсит (α -Fe), остаточный аустенит (γ -Fe), карбид вольфрама (WC), карбид ванадия (VC), трикарбид гептахрома (Cr_7C_3), имеющий гексагональную кристаллическую решетку, и гексакарбид 23-хрома, имеющий кубическую кристалличе-

скую решетку ($Cr_{23}C_6$) (рис. 4).

Как и при исследовании предыдущих штамповых сталей [2–4], установлено, что параметр кристаллической решетки мартенсита (табл. 1) имеет повышенные значения, что обусловлено растворением в нем легирующих элементов с большим атомным радиусом. Количество остаточного

аустенита составляет 3,9 %, что свидетельствует о качественно проведенной

термической обработке.

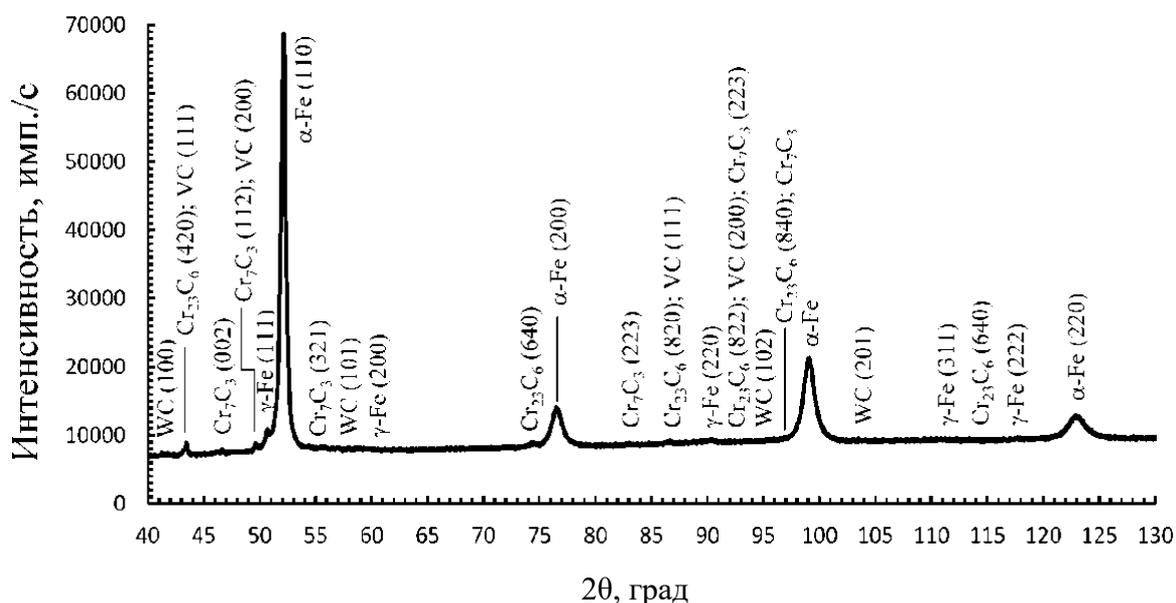


Рис. 4. Фрагмент рентгеновской дифрактограммы стали 4X4VMFC после классической термической обработки

Табл. 1. Фазовый состав, количество остаточного аустенита $A_{ост}$, параметр решетки a , физическое уширение β дифракционных линий и плотность дислокаций ρ стали 4X4VMFC в исходном состоянии

Образец	Фазовый состав	$A_{ост}$, %	$a_{\alpha-Fe}$, нм		β_{110} , 10^{-3} рад	β_{220} , 10^{-3} рад	ρ , 10^{12} см $^{-2}$
			эксперимент	эталон			
Исходный	α -Fe, γ -Fe, $Cr_{23}C_6$, Cr_7C_3 , WC, VC	3,9	0,2878	0,2866	11,1701	41,8426	24,1

Обработка тлеющим разрядом не приводит к изменению фазового состава стали (рис. 5 и 6).

В результате обработки происходит изменение параметра кристаллической решетки мартенсита, что связано с перераспределением легирующих элементов и попаданием их атомов в кристаллическую решетку α -Fe (табл. 2).

Как видно, обработка тлеющим разрядом по первому режиму приводит к снижению остаточного аустенита. Рост энергетических параметров разряда приводит к росту остаточного аустенита. Использование прикатодного магнитного поля приводит к значительному

росту остаточного аустенита при обработке по первому режиму, однако в отличие от обработки классическим тлеющим разрядом использование магнитного поля приводит к значительному снижению остаточного аустенита с ростом энергетических характеристик разряда.

Использование прикатодного магнитного поля приводит к снижению количества дефектов в стали в большей степени, чем при обработке классическим тлеющим разрядом, на что указывает снижение уширения дифракционных линий и уменьшение плотности дислокаций. Для обоих случаев обра-

ботки наблюдается снижение плотности дислокаций с ростом энергетических

характеристик тлеющего разряда.

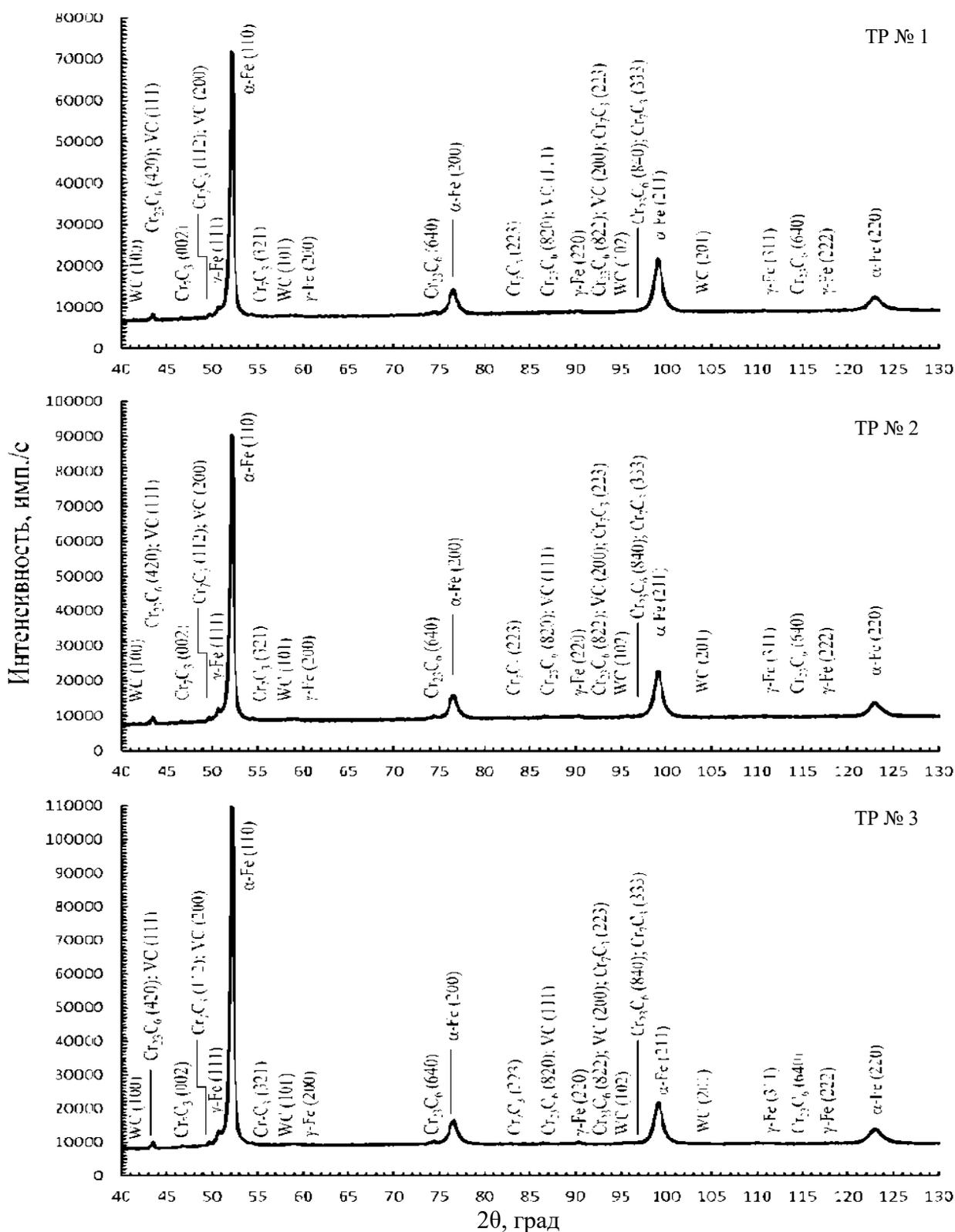


Рис. 5. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм образцов из стали 4X4BMFC после обработки тлеющим разрядом с различными режимами

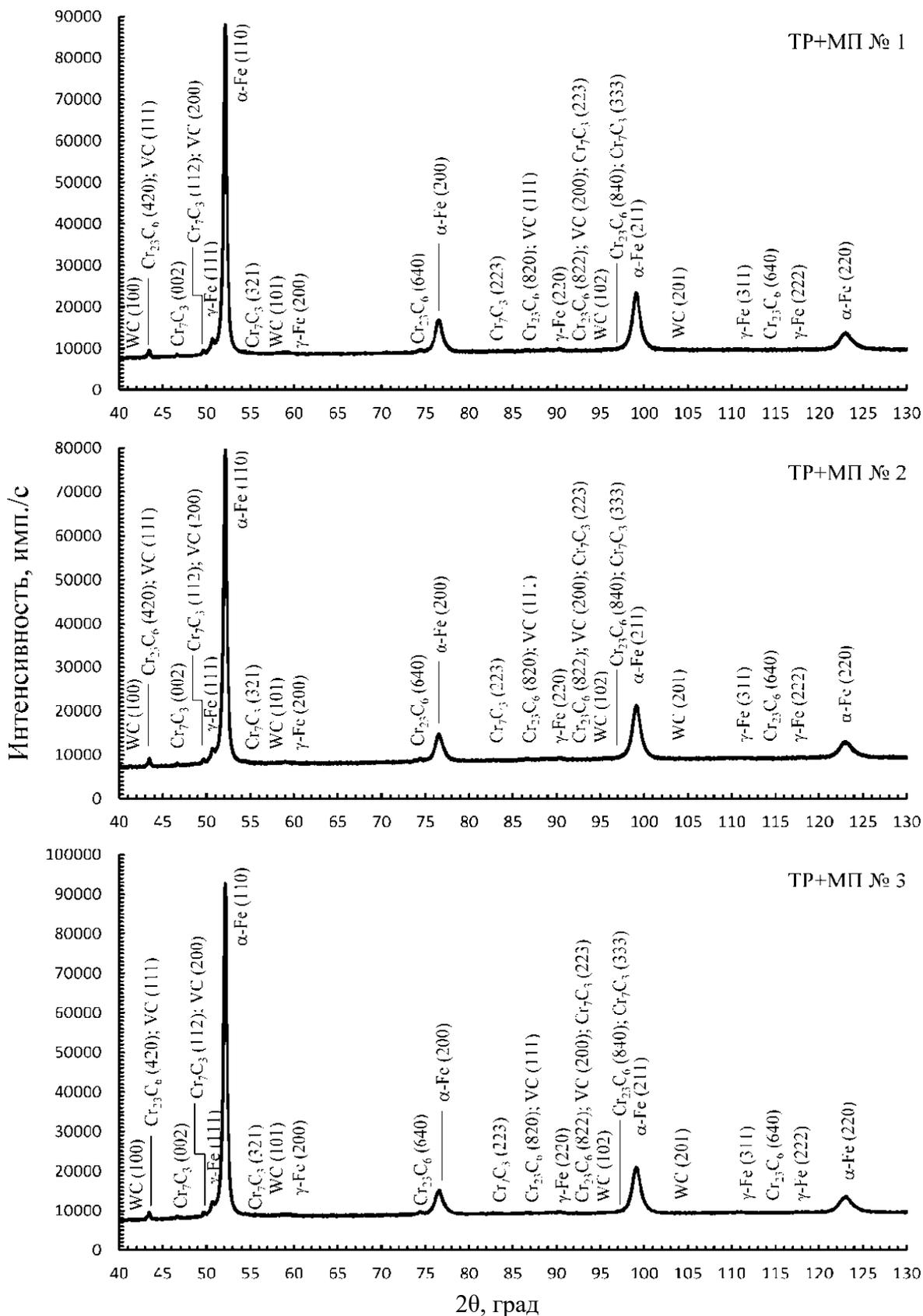


Рис. 6. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм образцов из стали 4Х4ВМФС после обработки тлеющим разрядом с различными режимами с использованием прикатодного магнитного поля

Табл. 2. Фазовый состав, количество остаточного аустенита $A_{ост}$, параметр решетки a , физическое уширение β дифракционных линий и плотность дислокаций ρ стали 4Х4ВМФС после различных режимов обработки

Образец (режим обработки)	Фазовый состав	$A_{ост}$, %	$a_{\alpha-Fe}$, нм	β_{110} , 10^{-3} рад	β_{220} , 10^{-3} рад	ρ , 10^{12} см $^{-2}$
ТР № 1	α -Fe, γ -Fe, $Cr_{23}C_6$, Cr_7C_3 , WC, VC	3,7	0,2877	10,1855	42,8997	25,3
ТР + МП № 1		6,0	0,2877	9,6509	38,1209	20,0
ТР № 2		4,3	0,2877	9,8700	38,4039	20,3
ТР + МП № 2		5,4	0,2877	10,4818	36,5260	18,3
ТР № 3		4,7	0,2877	10,0198	40,4838	22,5
ТР + МП № 3		3,0	0,2877	10,2609	41,8930	24,1

От выявленной тенденции отличаются результаты обработки по режиму № 3, где использование прикатодного магнитного поля приводит к росту уширения дифракционных линий и незначительному увеличению плотности дислокаций.

Исследуя отражение от дифракционной линии (640) гексакарбида 23-хрома, можно сделать вывод о том, что использование прикатодного магнитного

поля приводит к измельчению карбидной фазы по отношению к классической обработке вместе с ростом физического уширения и плотности дислокаций, что свидетельствует о росте сжимающих напряжений (табл. 3) [5].

Однако при обработке по режиму № 2 использование прикатодного магнитного поля, наоборот, приводит к росту размера частиц $Cr_{23}C_6$.

Табл. 3. Угловое положение линии (640), параметр решетки a , физическое уширение β дифракционных линий размера частиц и плотность дислокаций ρ фазы $Cr_{23}C_6$

Образец (режим обработки)	$2\theta_{260}$, град	a , нм	β_{260} , 10^{-3} рад	Размер частиц $Cr_{23}C_6$, нм	ρ , 10^{12} см $^{-2}$
Исходный	74,395	1,06692	9,2393	22,6	3,75
ТР № 1	74,465	1,06606	8,2261	25,7	2,91
ТР + МП № 1	74,475	1,06594	10,8753	19,4	5,08
ТР № 2	74,434	1,06644	8,9885	23,5	3,48
ТР + МП № 2	74,445	1,06631	7,4090	28,5	2,36
ТР № 3	74,390	1,06698	8,3073	25,4	2,97
ТР + МП № 3	74,445	1,06631	9,0999	23,2	3,56

Статистическая обработка экспериментальных данных дюрметрического анализа образцов до обработки и прошедших обработку тлеющим разрядом как с магнитным полем, так и без него позволила получить зависимость

приращения поверхностной твердости по Виккерсу. Графическая интерпретация полученных моделей представлена на рис. 7 и 8.

Сравнительный анализ полученных результатов приращения поверх-

ностной твердости (табл. 4) показал, что использование магнитного поля приводит к росту микротвердости поверхности на 5 % с одновременным снижением

удельной мощности горения разряда на 40 %...50 % и трехкратным сокращением времени обработки.

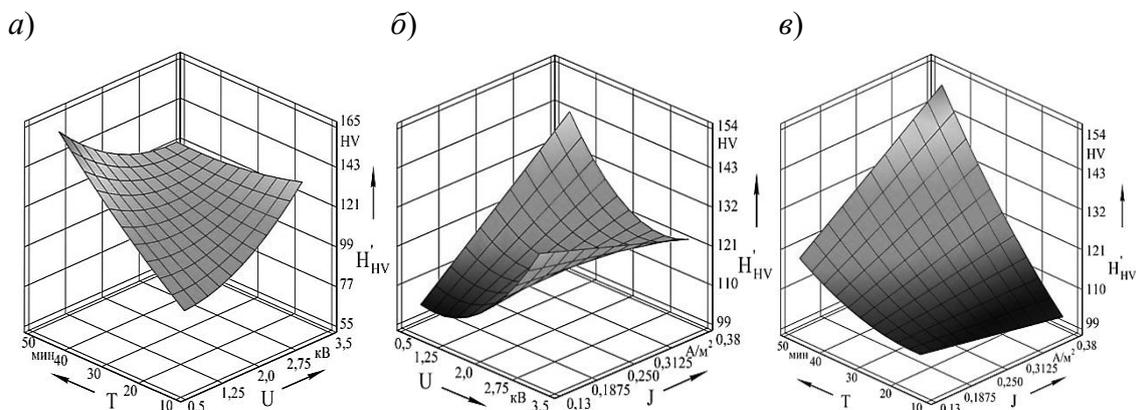


Рис. 7. Влияние напряжения U тлеющего разряда и времени обработки T (а), напряжения U и плотности тока J (б), плотности тока J тлеющего разряда и времени обработки T (в) на приращение микротвердости по Виккерсу поверхности образцов из стали 4Х4ВМФС при обработке тлеющим разрядом

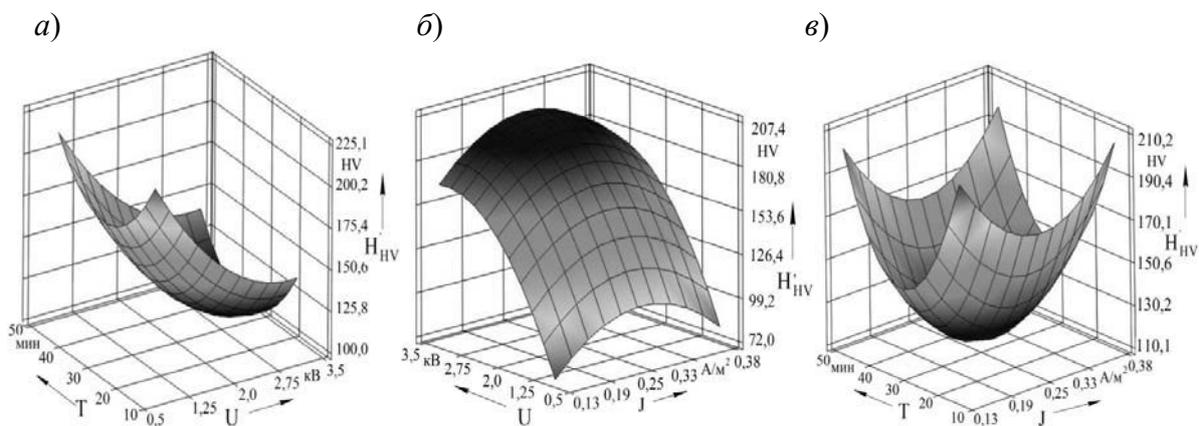


Рис. 8. Влияние напряжения U тлеющего разряда и времени обработки T (а), напряжения U и плотности тока J (б), плотности тока J тлеющего разряда и времени обработки T (в) на приращение микротвердости по Виккерсу поверхности образцов из стали 4Х4ВМФС при обработке тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем

Табл. 4. Оптимальные значения технологических параметров обработки образцов тлеющим разрядом, обеспечивающие получение наибольшей микротвердости

Вид обработки	Оптимальное значение технологических параметров обработки (см. рис. 7 и 8)				Приращение твердости ΔH_V , %
	U , кВ	J , mA/m^2	T , мин	W , kVt/m^2	
Тлеющий разряд	0,8	0,375	45	0,3	114
Тлеющий разряд с прикатодным магнитным полем	0,8	0,250	13	0,2	120

На основании статистической обработки экспериментальных данных исследования износостойкости также получена зависимость, графическая интерпретация которой представлена на рис. 9 и 10.

Сравнительный анализ полученных результатов (табл. 5) показал,

что использование магнитного поля приводит к росту износостойкости на 30 %...35 % с одновременным снижением удельной мощности горения разряда на 40 %...45 % с одновременным сокращением времени обработки на 50 %.

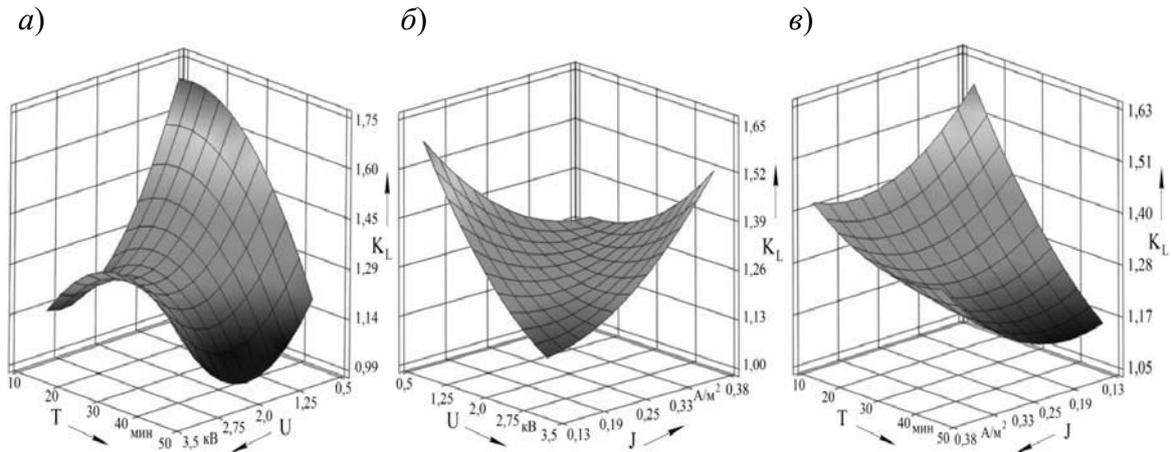


Рис. 9. Влияние напряжения U тлеющего разряда и времени обработки T (а), напряжения U и плотности тока J (б), плотности тока J тлеющего разряда и времени обработки T (в) на рост коэффициента износостойкости поверхности образцов из стали 4Х4ВМФС при обработке тлеющим разрядом

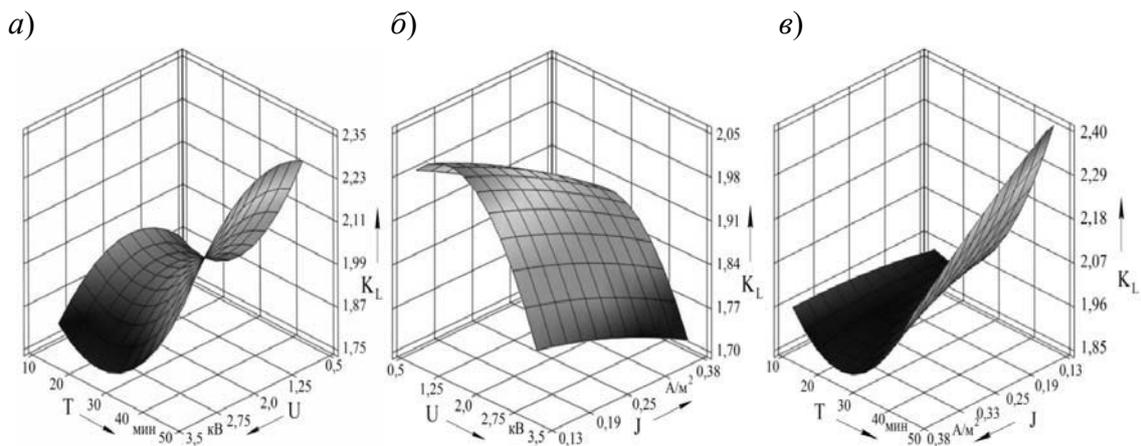


Рис. 10. Влияние напряжения U тлеющего разряда и времени обработки T (а), напряжения U и плотности тока J (б), плотности тока J тлеющего разряда и времени обработки T (в) на рост коэффициента износостойкости поверхности образцов из стали 4Х4ВМФС при обработке тлеющим разрядом с прикатодным магнитным полем

Табл. 5. Оптимальные значения технологических параметров обработки образцов тлеющим разрядом, обеспечивающие получение наибольшей износостойкости

Вид обработки	Оптимальное значение технологических параметров обработки (см. рис. 9 и 10)				Коэффициент износостойкости K_L
	U , кВ	J , мА/м ²	T , мин	W , кВт/м ²	
Тлеющий разряд	0,8	0,250	20	0,20	1,7
Тлеющий разряд с прикатодным магнитным полем	0,8	0,175	13	0,14	2,3

Проведенный анализ микротвердости по глубине образцов показал, что использование прикатодного магнитно-

го поля приводит к росту упрочненного поверхностного слоя в среднем на 50 %...55 % (рис. 11).

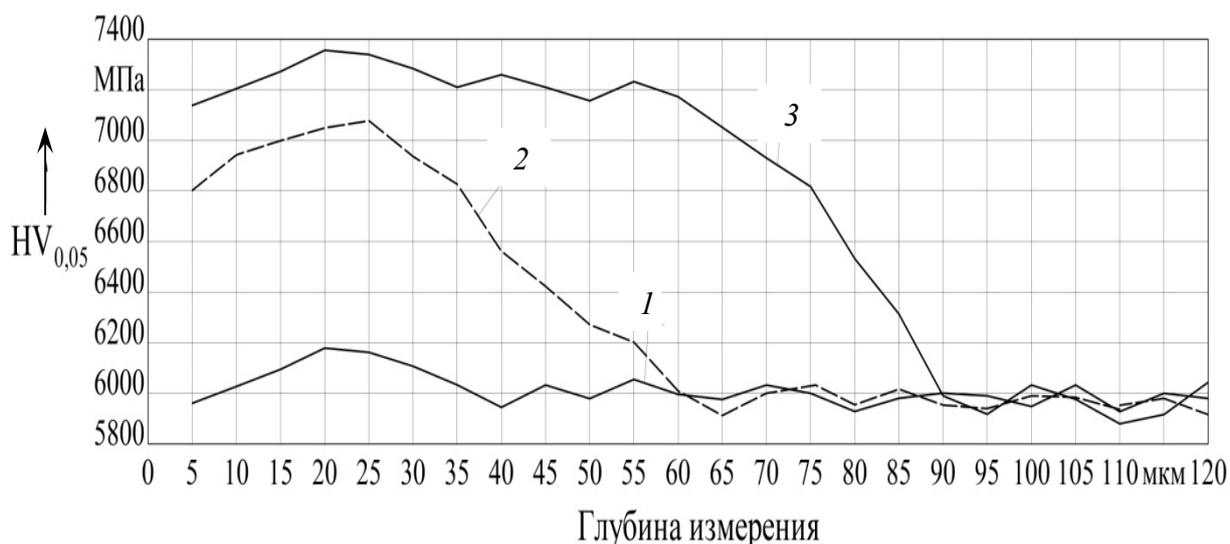


Рис. 11. Микротвердость поверхностного слоя образцов из стали 4Х4ВМФС: 1 – до обработки тлеющим разрядом; 2 – после обработки тлеющим разрядом; 3 – после обработки тлеющим разрядом с использованием прикатодного магнитного поля

Выводы

Обработка образцов из стали 4Х4ВМФС тлеющим разрядом не приводит к изменению параметра кристаллической решетки мартенсита.

Обработка тлеющим разрядом оказывает сложное влияние на количество остаточного аустенита. На минимальных режимах обработки наблюдается снижение его процентного содержания относительно исходного образца, однако с ростом энергетических параметров разряда происходит его рост.

Применение прикатодного магнитного поля приводит к обратной тенденции.

Использование прикатодного магнитного поля приводит к снижению количества дефектов в стали в большей степени, чем при обработке классическим тлеющим разрядом.

Влияние прикатодного магнитного поля на карбидную фазу носит сложный характер. На минимальных и максимальных режимах обработки магнитное поле приводит к измельчению частиц $Cr_{23}C_6$ и росту сжимающих напряжений в них. На режимах обработки, соответ-

ствующих средним значениям, наблюдается обратная картина.

Применение прикатодного магнитного поля в процессе упрочнения изделий из штамповой стали 4Х4ВМФС тлеющим разрядом приводит к росту микротвердости поверхности на 5 %, из-

носостойкости на 30 %...35 % с одновременным снижением удельной мощности горения разряда на 40 %...50 % и значительным сокращением времени обработки. Глубина упрочненного слоя увеличивается на 50 %...55 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Структурно-фазовое модифицирование инструментальных материалов тлеющим разрядом : монография / В. М. Шеменков [и др.] ; под общ. ред. В. М. Шеменкова. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 270 с.: ил.
2. **Рабыко, М. А.** Структурно-фазовое модифицирование штамповых сталей обработкой тлеющим разрядом в магнитном поле / М. А. Рабыко, В. М. Шеменков, А. Н. Елисеева // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 2 (75). – С. 23–31.
3. **Рабыко, М. А.** Влияние прикатодного магнитного поля на структурно-фазовое состояние инструментальной штамповой стали 5Х3В3МФС при обработке ее тлеющим разрядом / М. А. Рабыко, В. М. Шеменков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 3 (76). – С. 77–86.
4. **Шеменков, В. М.** Влияние прикатодного магнитного поля на степень упрочнения тлеющим разрядом штамповой стали Х12МФ / В. М. Шеменков, М. А. Рабыко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2023. – № 2 (79). – С. 118–128.
5. **Горелик, С. С.** Рентгенографический и электронно-оптический анализ : учебное пособие / С. С. Горелик, Ю. А. Скаков, Л. Н. Расторгуев. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: МИСиС, 2002. – 360 с.: ил.
6. **Лысак, Л. И.** Определение истинной ширины рентгеновских интерференционных линий с применением стандартного образца / Л. И. Лысак // Вопросы физики металлов и металловедения: сб. тр. – Киев, 1955. – № 6. – С. 40–53.

Статья сдана в редакцию 10 июля 2023 года

Контакты:

VShemenkov@yandex.ru (Шеменков Владимир Михайлович);

belay-marina@yandex.by (Рабыко Марина Александровна);

Vladislavshemenkov@gmail.com (Шеменков Владислав Владимирович).

V. M. SHEMENKOV, M. A. RABYKO, V. V. SHEMENKOV

INFLUENCE OF THE CATHODE MAGNETIC FIELD ON THE EFFICIENCY OF THE PROCESS OF GLOW DISCHARGE STRENGTHENING OF 4X4VMFS STAMPED STEEL

Abstract

The paper presents results of the study of microhardness, wear resistance, structure and phase composition of samples made of 4X4VMFS stamped steel after classical quenching and subjected to glow discharge treatment, both with and without a magnetic field.

Keywords:

glow discharge, microhardness, wear resistance, structure, phase composition, modifying treatment, surface layer, steel.

For citation:

Shemenkov, V. M. Influence of the cathode magnetic field on the efficiency of the process of glow discharge strengthening of 4x4vmfs stamped steel / V. M. Shemenkov, M. A. Rabyko, V. V. Shemenkov // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 3 (80). – P. 115–125.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

DOI: 10.53078/20778481_2023_3_126

УДК 621.365:66

Т. С. ЛАРЬКИНА¹

Г. С. ЛЕНЕВСКИЙ², канд. техн. наук, доц.

¹Научно-исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске (Смоленск, Россия)

²Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

АНАЛИЗ РАБОТЫ ИНВЕРТОРОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СИСТЕМАХ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА, ПРИ ПОМОЩИ MATLAB

Аннотация

Статья посвящена исследованию работы инверторов, используемых в системах индукционного нагрева, с помощью MATLAB. В рамках работы разработана математическая модель инвертора, которая была протестирована в среде Simulink. Для проведения исследований определены значения параметров нагрузки и инвертора, включая сопротивление, индуктивность, ёмкость, напряжение и ток.

Работа модели проиллюстрирована с помощью графиков тока и напряжения на звене постоянного тока и на нагрузке. Также был проведён гармонический анализ напряжения на нагрузке, что дало возможность более детально изучить работу инвертора в различных режимах.

Ключевые слова:

инвертор, индукционный нагрев, MATLAB, моделирование, преобразователь частоты, Simulink, электротехника, электрическая мощность, частота, ток, напряжение, гармонический анализ, диоды, конденсатор, IGBT.

Для цитирования:

Ларькина, Т. С. Анализ работы инверторов, используемых в системах индукционного нагрева, при помощи MATLAB / Т. С. Ларькина, Г. С. Ленецкий // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 3 (80). – С. 126–133.

В современном мире индукционный нагрев является широко используемой технологией в промышленности и быту. Индукционный нагрев применяется для быстрого нагрева металлов, плавки, затвердевания и термической обработки, а также для обогрева пищи, медицинских препаратов и других материалов. Одним из ключевых элементов системы индукционного нагрева являются инверторы, которые преобразуют постоянный ток сети в переменный ток высокой частоты, необходимый для создания электромагнитного поля, обеспечивающего нагрев материала [1].

В настоящее время существует множество различных методов анализа

работы инверторов в системах индукционного нагрева. Однако в связи с быстро развивающейся технологией возникают новые требования к работе инверторов, и необходимо разработать более точные методы анализа и оптимизации их работы.

Целью статьи является исследование работы инверторов, используемых в системах индукционного нагрева, при помощи MATLAB. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- провести обзор существующих методов анализа работы инверторов в системах индукционного нагрева;
- разработать математические

модели инверторов и произвести их тестирование;

- проанализировать работу инверторов на различных режимах нагрузки;
- провести сравнительный анализ результатов моделирования;
- оптимизировать работу инверторов для повышения эффективности систем индукционного нагрева.

Для понимания работы инверторов, используемых в системах индукционного нагрева, необходимо обладать знаниями в области электроники, электротехники и электромагнитных взаимодействий.

Анализ работы инверторов начинается с изучения принципа работы преобразователей постоянного тока в переменный ток (DC-AC) или инверторов. Инверторы могут быть однофазными или трёхфазными и работать на частоте от 20 до 200 кГц. Инверторы представляют собой ключевые элементы системы индукционного нагрева, поскольку они преобразуют постоянный ток сети в переменный ток высокой частоты [2].

Для создания электромагнитного поля, обеспечивающего нагрев материала, используется индукционный нагревательный элемент. Элемент может быть представлен различными формами и размерами, и его электрические параметры зависят от его геометрии и материала. Разработка математической модели индукционного нагревательного элемента является сложной задачей, поскольку он является многопараметрической системой.

Для анализа работы инверторов используются различные методы, включая аналитические методы, методы численного моделирования и экспериментальные исследования. Аналитические методы основаны на математическом анализе принципов работы инверторов и их компонентов. Методы численного моделирования позволяют проводить более точный анализ работы инверторов с помощью компьютерных

программ, такие как MATLAB. Экспериментальные исследования позволяют проверить результаты, полученные при помощи аналитических и численных методов.

Одной из основных проблем, с которыми сталкиваются при анализе работы инверторов, является эффективность их работы. Низкая эффективность инверторов может привести к потере энергии и повышенному расходу электричества. Поэтому одним из главных фокусов данной работы является анализ эффективности работы инверторов, используемых в системах индукционного нагрева. Оценка эффективности производится посредством анализа показателей, таких как коэффициент мощности, КПД и общее потребление энергии. Это важно, т. к. повышение эффективности работы инверторов может привести к снижению затрат на электроэнергию и уменьшению эксплуатационных расходов [3–5].

Рассмотрим основные компоненты инверторов, такие как транзисторы и диоды, и изучим их влияние на работу инверторов. Особое внимание будет уделено разработке математической модели инвертора, которая позволит оценить его работу в различных режимах и условиях.

Для расчёта математической модели инвертора необходимо определить характеристики нагрузки, включая сопротивление, индуктивность и ёмкость. В данном случае рассмотрим нагрузку с сопротивлением 10 Ом, индуктивностью 0,5 Гн и ёмкостью 10 мкФ.

На основании параметров нагрузки можно определить параметры инвертора. Для расчёта математической модели инвертора будем использовать преобразование частоты. Для этого необходимо определить частоту сигнала, которую будем использовать в инверторе.

В работе будет применён пакет прикладных программ MATLAB для проведения численного моделирования

ния работы инверторов. MATLAB позволяет создавать математические модели и проводить их моделирование, что даёт возможность оценить работу инверторов в различных условиях, включая изменение частоты, нагрузки и температуры.

Исходя из вышеприведенных параметров можно составить математическую модель инвертора и произвести её моделирование в MATLAB Simulink.

Математическая модель инвертора включает в себя уравнения, описывающие его работу. Она основывается на следующих принципах:

- инвертор состоит из ключевых компонентов, включая транзисторы и диоды, которые управляются сигналами с контроллера;
- ток в нагрузке определяется как функция напряжения на ней и величинами параметров инвертора;
- нагрузка представляется как параллельное соединение сопротивления и индуктивности.

Математическая модель инвертора может быть представлена в виде системы уравнений [6]:

$$V_{in}(t) = L \frac{di(t)}{dt} + R \cdot i(t) + V_{out}(t);$$

$$V_{out}(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt;$$

$$i(t) = I_{max} \sin(2\pi ft);$$

$$V_{in}(t) = V_{dc} + V_{ac} \sin(2\pi ft), \quad (1)$$

где V_{in} – входное напряжение; L – индуктивность нагрузки; R – сопротивление нагрузки; V_{out} – выходное напряжение; C – ёмкость нагрузки; $i(t)$ – ток в нагрузке; I_{max} – максимальный ток; f – частота; V_{dc} – постоянное напряжение; V_{ac} – переменное напряжение.

Математическая модель на рис. 1, собранная из блоков в Simulink, представляет собой цепь из нескольких звеньев, каждое из которых выполняет определённую функцию.

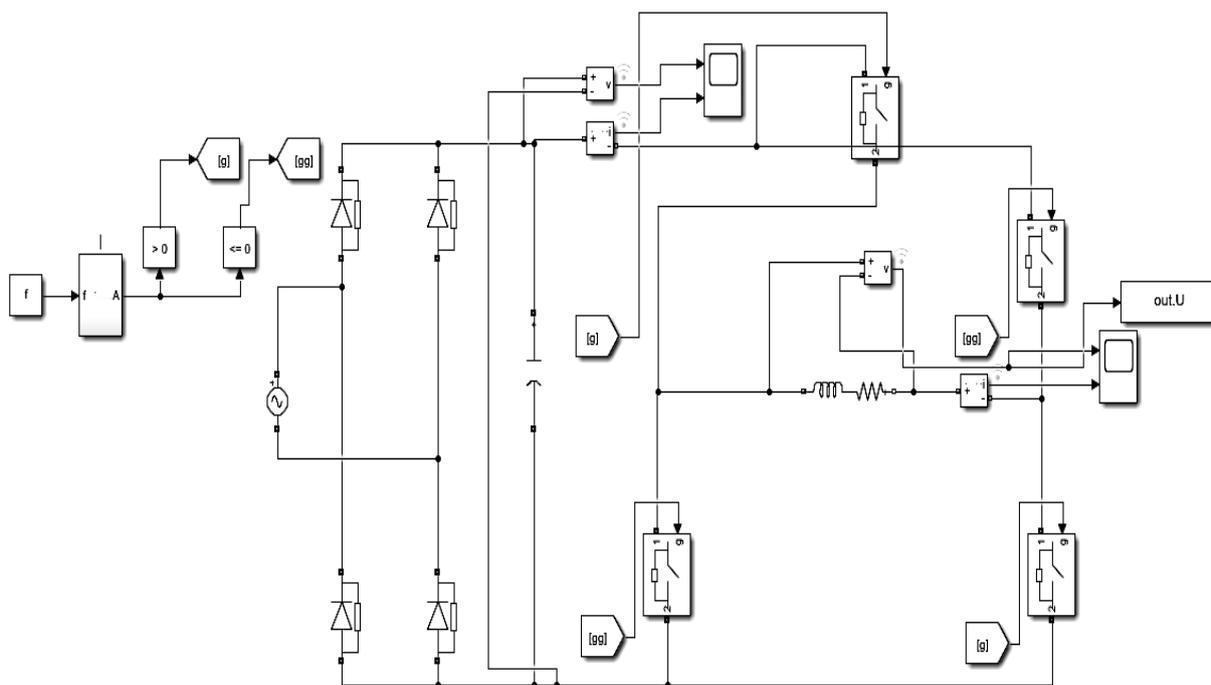


Рис. 1. Математическая модель инвертора индукционного нагрева

Первым звеном является питающий инвертор, преобразующий переменный ток сети в переменный ток определённой частоты, который затем поступает на следующее звено.

Следующее звено – это звено постоянного тока, которое состоит из выпрямителя на диодах и конденсатора для сглаживания напряжения. В этом звене переменный ток преобразуется в постоянный.

Далее идёт преобразователь частоты, реализованный на IGBT-транзисторах. Он используется для изменения частоты переменного тока, поступающего на нагрузку.

Нагрузка также является частью модели и представляет собой некоторое устройство, которое должно быть нагрето при помощи технологии индукционного нагрева [7, 8].

Таким образом, представленная модель собрана из трех основных звеньев: питающего инвертора сети переменного тока, звена постоянного тока и преобразователя частоты на IGBT-транзисторах, а также с учётом нагрузки, представленной схемой замещения индуктора, которая должна быть нагрета. Эта модель позволяет изучать и анализировать работу инвертора в системе индукционного нагрева в прикладной среде MATLAB.

Основными допущениями представленной модели являются следующие.

1. Идеализация компонентов: все компоненты модели рассматриваются как идеальные, без учета их реальных физических свойств, таких как внутреннее сопротивление, индуктивность, ёмкость и т. д.

2. Упрощённая математическая модель: модель представляет собой упрощённую математическую схему, которая не учитывает многие физические процессы, происходящие в реальной системе, такие как потери мощности, электромагнитные помехи и т. д.

3. Отсутствие внешних воздей-

ствий: модель не учитывает внешние воздействия на систему, такие как изменение температуры окружающей среды, влияние соседних электромагнитных полей и т. д.

4. Идеализация нагрузки: нагрузка рассматривается как идеальная, без учёта её динамических изменений во времени, возможных перепадов напряжения и т. д.

Все эти допущения позволяют упростить математическую модель и ускорить процесс её моделирования, но также могут сказаться на точности результатов моделирования.

Исследование работы инвертора будет на частотах 2 и 8 кГц в связи с их практической значимостью и распространённостью в системах индукционного нагрева. Частота 2000 Гц является стандартной и широко используется в различных промышленных приложениях. Однако современные технологические требования могут потребовать более высоких частот для достижения более точного и эффективного нагрева [9]. Поэтому мы также рассматриваем частоту 8000 Гц, которая представляет собой более высокий уровень частоты и может быть полезной для специализированных приложений, где требуется повышенная точность и скорость нагрева. Исследование на обоих частотах позволяет нам сравнить и оценить влияние частоты инвертора на качество и эффективность индукционного нагрева, что имеет практическое значение для оптимизации работы систем индукционного нагрева в различных областях применения.

Результаты моделирования работы инвертора с помощью разработанной математической модели в среде Simulink приведены на рис. 2–5.

На рис. 2 и 4 представлены графики тока и напряжения на звене постоянного тока и на нагрузке. Заданная частота инвертора составляет 2 и 8 кГц соответственно.

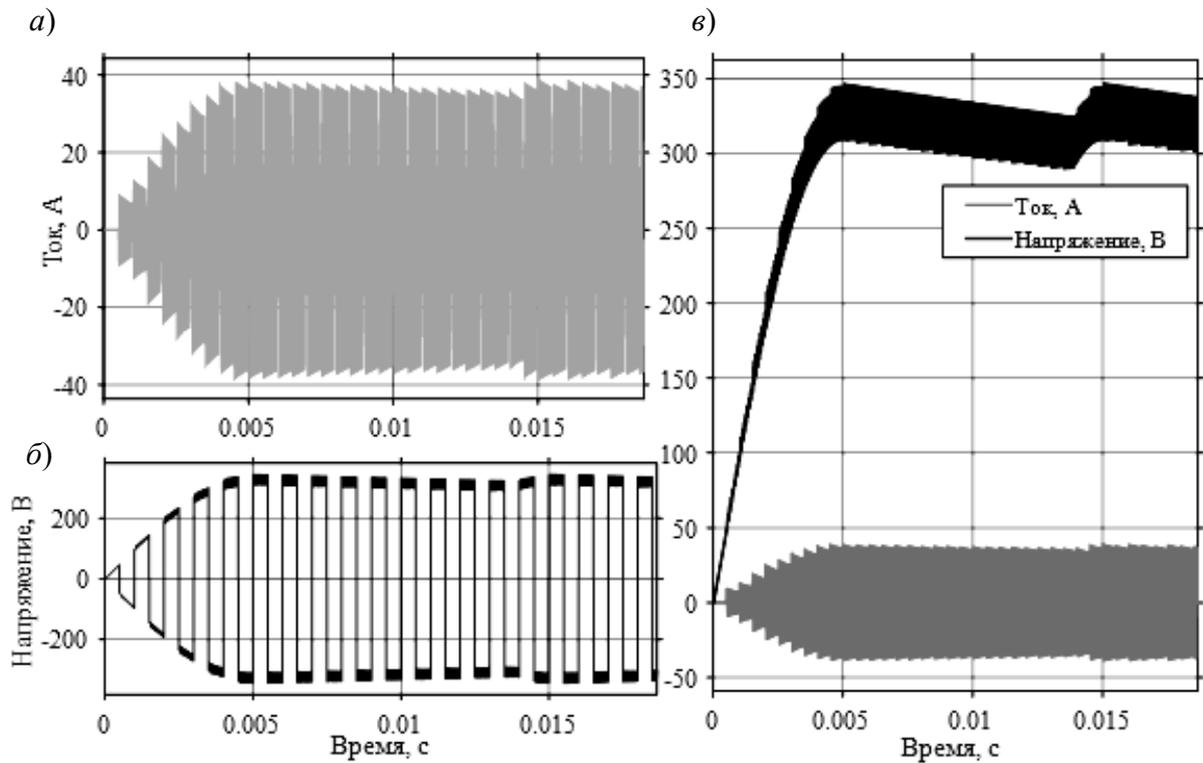


Рис. 2. Результаты моделирования при частоте инвертора 2 кГц: а – ток индуктора; б – напряжение на индукторе; в – ток и напряжение на сглаживающем конденсаторе

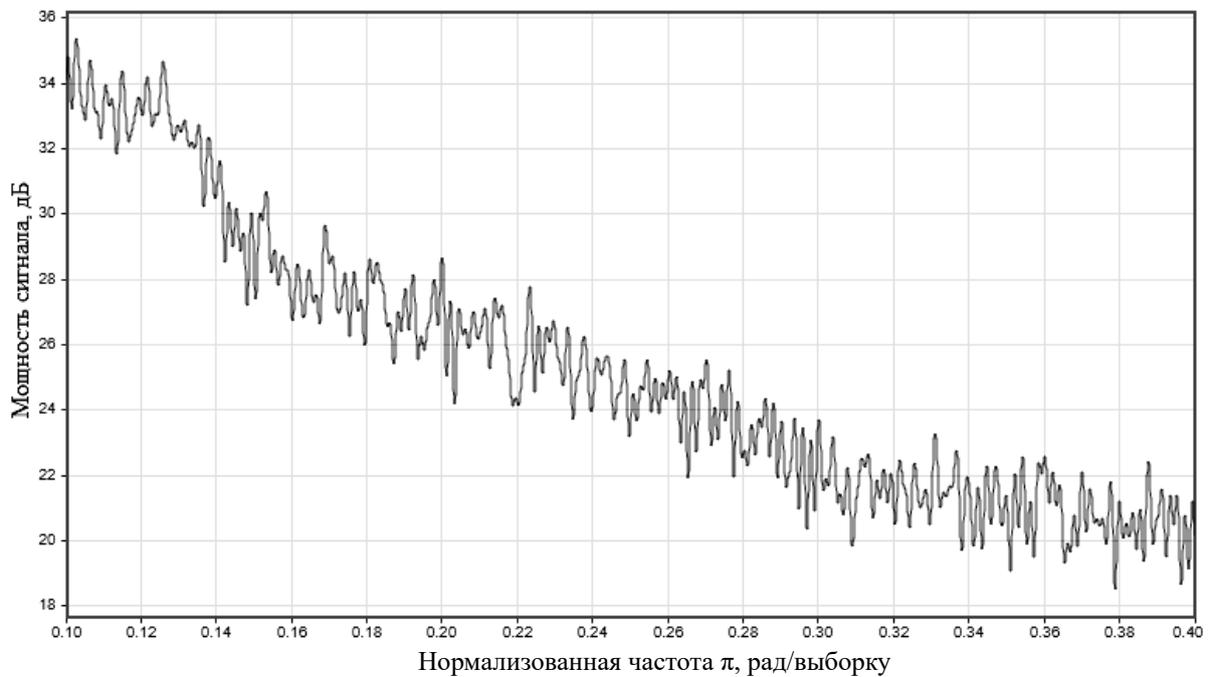


Рис. 3. Изменение мощности сигнала на выходе коммутационных ключей инвертора от нормализованной частоты (2 кГц)

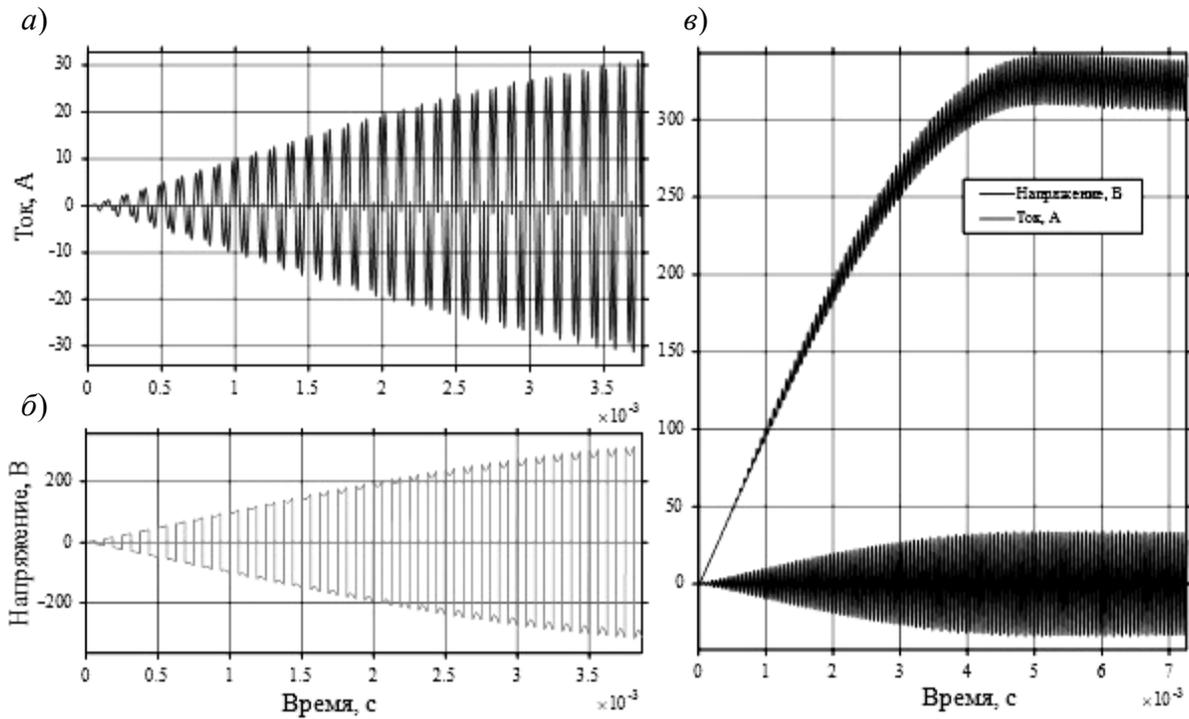


Рис. 4. Результаты моделирования при частоте инвертора 8 кГц: а – ток индуктора; б – напряжение на индукторе; в – ток и напряжение на сглаживающем конденсаторе

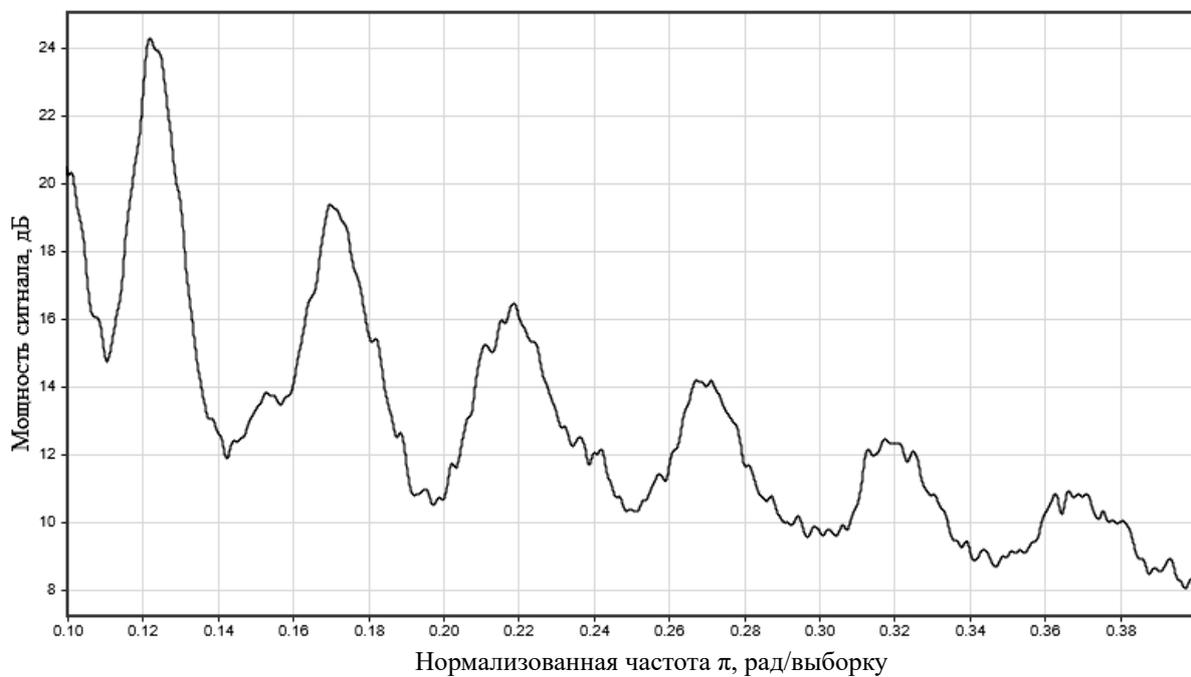


Рис. 5. Изменение мощности сигнала на выходе коммутационных ключей инвертора от нормализованной частоты (8 кГц)

На рис. 3 и 5 представлены изменения мощности сигнала на выходе коммутационных ключей инвертора от нормализованной частоты, что даёт возможность более детально изучить работу инвертора в различных режимах.

В процессе проведения гармонического анализа изучено изменение амплитуды гармонических составляющих напряжения на нагрузке при работе инвертора на частотах 2 кГц (см. рис. 3) и 8 кГц (см. рис. 5). Результаты анализа показали, что при увеличении частоты инвертора до 8 кГц амплитуда гармонических составляющих значительно уменьшается, что указывает на улучшение качества выходного напряжения. Это имеет важное значение для приложений, где требуется более стабильное и точное напряжение для эффективного индукционного нагрева [11].

Однако нужно учесть, что с увеличением частоты инвертора возрастает значение общего гармонического искажения выходного напряжения. Это может иметь отрицательное влияние на эффективность системы, т. к. увеличение гармонических искажений может привести к дополнительным потерям мощности и снижению КПД. Поэтому при выборе частоты инвертора необходимо учитывать баланс между каче-

ством выходного напряжения и энергетической эффективностью системы.

Выводы

Проведено исследование работы инвертора, используемого в системе индукционного нагрева, при помощи MATLAB Simulink. Разработана математическая модель инвертора, учитывающая основные допущения, такие как отсутствие потерь в инверторе и упрощённый расчёт влияния индуктивности и ёмкости нагрузки на инвертор. С помощью разработанной модели промоделирована работа инвертора на частотах 2 и 8 кГц и получены графики тока и напряжения на звене постоянного тока и на нагрузке. Проведен гармонический анализ напряжения на нагрузке при заданных частотах, который показал, что при частоте 8 кГц уровень искажений намного ниже, чем при частоте 2 кГц.

В результате исследования выявлено, что для обеспечения более стабильной и эффективной работы системы индукционного нагрева необходимо использовать инверторы с более высокими частотами. Однако следует учитывать, что с увеличением частоты инвертора увеличивается риск перегрева компонентов системы, а также возрастает сложность контроля параметров системы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ларькина, Т. С. Параметрический идентификационный метод для системы косвенного индукционного нагрева жидкости / Т. С. Ларькина, В. В. Лыготчиков, Г. С. Ленецкий // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2018. – № 3(60). – С. 70–76.
2. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеев. – Москва: Энергия, 1977. – 344 с.: ил.
3. Рапопорт, Э. Я. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева / Э. Я. Рапопорт, Ю. Э. Плешивцева. – Москва: Наука, 2012. – 309 с.
4. Дилигенская, А. Н. Аналитические условия оптимальности в обратных задачах теплопроводности / А. Н. Дилигенская, Э. Я. Рапопорт // ТВТ. – 2021. – Вып. 59:3. – С. 401–410.
5. Плешивцева, Ю. Э. Метод последовательной параметризации управляющих воздействий в краевых задачах оптимального управления системами с распределёнными параметрами / Ю. Э. Плешивцева, Э. Я. Рапопорт // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2009. – № 3. – С. 22–33.
6. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник / Л. А. Бессонов. – 12-е изд., испр. и доп. – Люберцы: Юрайт, 2016. – 701 с.
7. Лыготчиков, В. В. Синтез системы автоматического регулирования температуры жидкости с улучшенными динамическими показателями / В. В. Лыготчиков, Т. С. Ларькина // Вестн. МЭИ. – 2019. – № 5. – С. 73–80.

8. **Льготчиков, В. В.** Алгоритм работы контроллера управления электромагнитным процессом в длинной линии / В. В. Льготчиков, В. Н. Денисов, Т. С. Ларькина // Программные продукты и системы / Software & Systems. – 2018. – № 4 (31). – С. 798–802.

9. **Рапопорт, Э. Я.** Структурно-параметрический синтез оптимальных по быстродействию систем управления с распределенными параметрами в условиях интервальной неопределенности характеристик объекта / Э. Я. Рапопорт, И. С. Левин // Автометрия. – 2015. – Т. 51, № 5. – С. 3–16.

10. **Рапопорт, Э. Я.** Оптимизация процессов индукционного нагрева металла / Э. Я. Рапопорт. – Москва: Металлургия, 1993. – 279 с.

11. **Рапопорт, Э. Я.** Оптимальное управление системами с распределенными параметрами / Э. Я. Рапопорт. – Москва: Высшая школа, 2009. – 677 с.

Статья сдана в редакцию 12 мая 2023 года

Контакты:

tatyana.larkina.2015@yandex.ru (Ларькина Татьяна Сергеевна);

emos@rambler.ru (Леневский Геннадий Сергеевич).

T. S. LARKINA, G. S. LENEVSKY

ANALYSIS OF THE OPERATION OF INVERTERS IN INDUCTION HEATING SYSTEMS USING MATLAB

Abstract

The article presents the investigation of operation of inverters used in induction heating systems carried out through MATLAB. As part of the work, a mathematical model of the inverter was developed and tested in the Simulink environment. To conduct the research, the values of load and inverter parameters were determined, including resistance, inductance, capacitance, voltage, and current.

The performance of the model was illustrated by current and voltage graphs on the DC link and the load. Also, a harmonic analysis of the voltage on the load was conducted, which made it possible to carry out a more detailed study of the inverter performance under different modes.

Keywords:

inverter, induction heating, MATLAB, modeling, frequency converter, Simulink, electrical engineering, electrical power, frequency, current, voltage, harmonic analysis, diodes, capacitor, IGBT.

For citation:

Larkina, T. S. Analysis of the operation of inverters in induction heating systems using MATLAB / T. S. Larkina, G. S. Lenevsky // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 3 (80). – P. 126–133.

DOI: 10.53078/20778481_2023_3_134

УДК 621.316

Г. С. ЛЕНЕВСКИЙ¹, канд. техн. наук, доц.

А. А. СИНЮКОВИЧ²

Д. В. ШНИП¹

¹Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

²LLC «NOVUS INDUSTRY» (Могилев, Беларусь)

РАЗРАБОТКА НОВОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОДУКЦИИ LLC «NOVUS INDUSTRY» НА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИИ ПО «ОВЕН»

Аннотация

Рассматриваются различные аспекты создания специализированного испытательного оборудования, обосновываются требования и технические рекомендации к конструктивным элементам электрооборудования и особенностям проведения испытаний. Разработана схема электрическая принципиальная, изготовлен опытный образец, выполнена апробация в производственных условиях LLC «NOVUS INDUSTRY».

Ключевые слова:

автоматизированный электропривод, алгоритм, датчики, управление, механизм для перемещения выдвижных элементов конструкции мебели, LLC «NOVUS INDUSTRY», ПО «ОВЕН».

Для цитирования:

Леневский, Г. С. Разработка нового испытательного оборудования для продукции LLC «NOVUS INDUSTRY» на электрооборудовании ПО «ОВЕН» / Г. С. Леневский, А. А. Синюкович, Д. В. Шнип // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 3 (80). – С. 134–143.

Введение

LLC «NOVUS INDUSTRY» – резидент СЭЗ «Могилев», один из крупнейших комплексов деревообрабатывающих и мебельных фабрик в Восточной Европе [1]. В производственной программе более 100 разных моделей мебели, в большинстве конструкций которых используются выдвижные элементы. Надежная работа мебели во всех периодах времени от проектирования и изготовления до завершения ее эксплуатации обеспечивается:

– собственно конструкцией мебели, что обеспечивается работой инженеров-конструкторов высокой квалификации;

– технологическими процессами и технологическим оборудованием при изготовлении элементов конструкций мебели, что обеспечивается работой

специалистов высокой квалификации, а именно инженеров-технологов, инженеров-электроприводчиков, инженеров-механиков, инженеров-электронщиков, IT-специалистов и др.;

– выполнением алгоритмов сборки и транспортировки;

– климатическими и техническими условиями при эксплуатации;

– другими процессами и условиями.

Надежная работа механизмов для перемещения выдвижных элементов конструкции мебели (МПВЭКМ) во всем периоде времени от проектирования и изготовления до завершения эксплуатации собственно мебели обеспечивается аналогично вышеизложенному, отличие лишь в том, что LLC «NOVUS INDUSTRY» не изготавливает МПВЭКМ, а использует МПВЭКМ прочих изготовителей.

При использовании МПВЭКМ

прочих изготовителей в LLC «NOVUS INDUSTRY» накоплен большой опыт. МПВЭКМ большой группы предприятий при проведении опытной эксплуатации мебели в условиях LLC «NOVUS INDUSTRY», а также при проведении испытаний не подтверждают требуемые и заявленные предприятиями-изготовителями технические характеристики. Данные обстоятельства и некоторые другие, которые будут рассмотрены далее, мотивировали выполнение работ по созданию нового специализированного испытательного оборудования.

ПО «ОВЕН» [2] сегодня – это один из крупнейших ведущих разработчиков и производителей, более 30 лет находящийся на рынке средств промышленной автоматизации. Продукция ПО «ОВЕН» включает более 250 наименований следующей продукции для создания АСУ ТП любого уровня сложности.

1. Контрольно-измерительные приборы: измерители-регуляторы для ГВС, отопления, вентиляции и котельных, измерители-регуляторы для пищевых производств, счетчики, таймеры, тахометры для управления насосами и для электрических сетей, архиваторы, ручные задатчики сигналов, дополнительные устройства.

2. Программируемые устройства: программируемые реле, программируемые логические контроллеры (ПЛК), сенсорные панельные контроллеры, панели оператора, модули ввода/вывода.

3. Силовые и коммутационные устройства: преобразователи частоты (ПЧ), дроссели, тормозные резисторы, блоки питания, устройства коммутации, устройства контроля и защиты, регуляторы мощности, твердотельные реле, промежуточные реле, приборы для индикации и управления задвижками, оборудование-микроклимат для шкафов управления, электротехническое оборудование MEYERTEC (посты кнопочные, цифровые индикаторы, сигнальные

устройства, светосигнальные колонны, концевые выключатели, аксессуары, устройства управления, регуляторы мощности, нагреватели шкафов, потенциометры, термостаты и др.).

4. Датчики: датчики температуры, датчики влажности и температуры воздуха, преобразователи давления, датчики уровня, датчики газа, бесконтактные датчики, барьеры искрозащиты, нормирующие преобразователи, аксессуары к датчикам температуры, аксессуары к датчикам давления, аксессуары к датчикам уровня, аксессуары к датчикам влажности.

5. Программное обеспечение, устройства связи: OwenCloud, SCADA-системы, OPC-серверы, конфигураторы, среда программирования CODESYS, программное обеспечение Owen Logic, драйверы и библиотеки «ОВЕН», коммутаторы, преобразователи интерфейсов и повторители, модемы, PLC-модемы и другие аксессуары.

Продукция ПО «ОВЕН» широко используется для создания АСУ ТП любого уровня сложности в работе тысяч предприятий России и стран СНГ.

В связи со сложившейся международной обстановкой, с одной стороны, учитывая большой опыт кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Белорусско-Российского университета в области обеспечения учебного процесса, а также реализованных научно-конструкторских проектов на оборудовании ПО «ОВЕН», с другой стороны, принято решение разработать новое испытательное оборудование для продукции LLC «NOVUS INDUSTRY» на электрооборудовании ПО «ОВЕН».

Объект испытаний

Объектом испытаний являются МПВЭКМ (рис. 1 и 2). В конструкции компонентов МПВЭКМ на рис. 1 и 2 для перемещения выдвигаемых элементов

конструкции мебели входят следующие конструктивные элементы одного типа:

основание 1 (рейка или направляющая), ролик 2 (диск, колесо), ось 3.

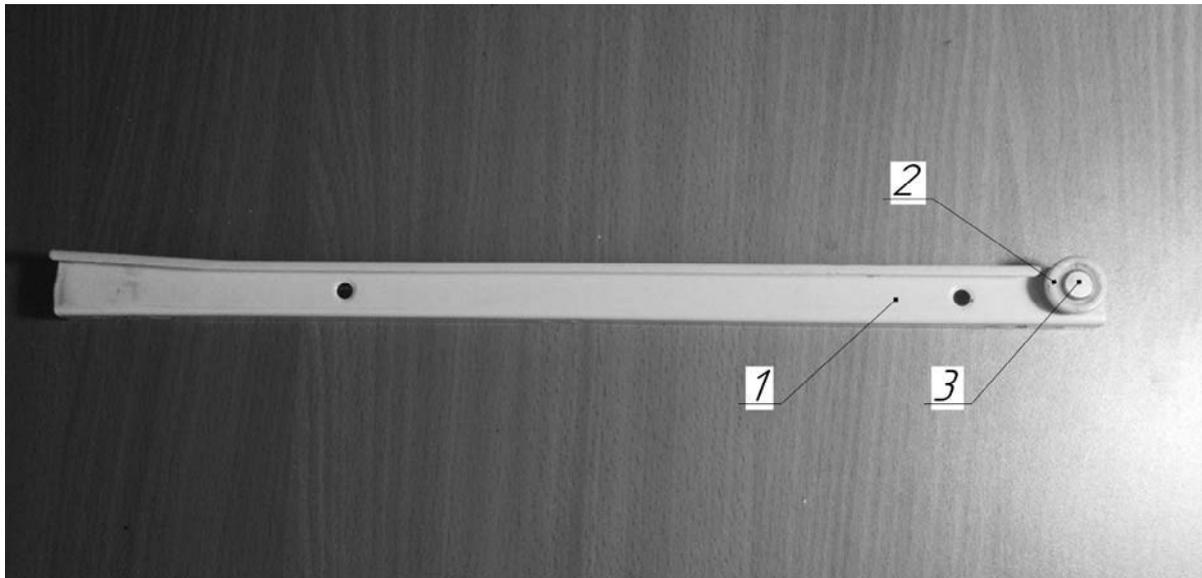


Рис. 1. Конструкция подвижного компонента МПВЭКМ

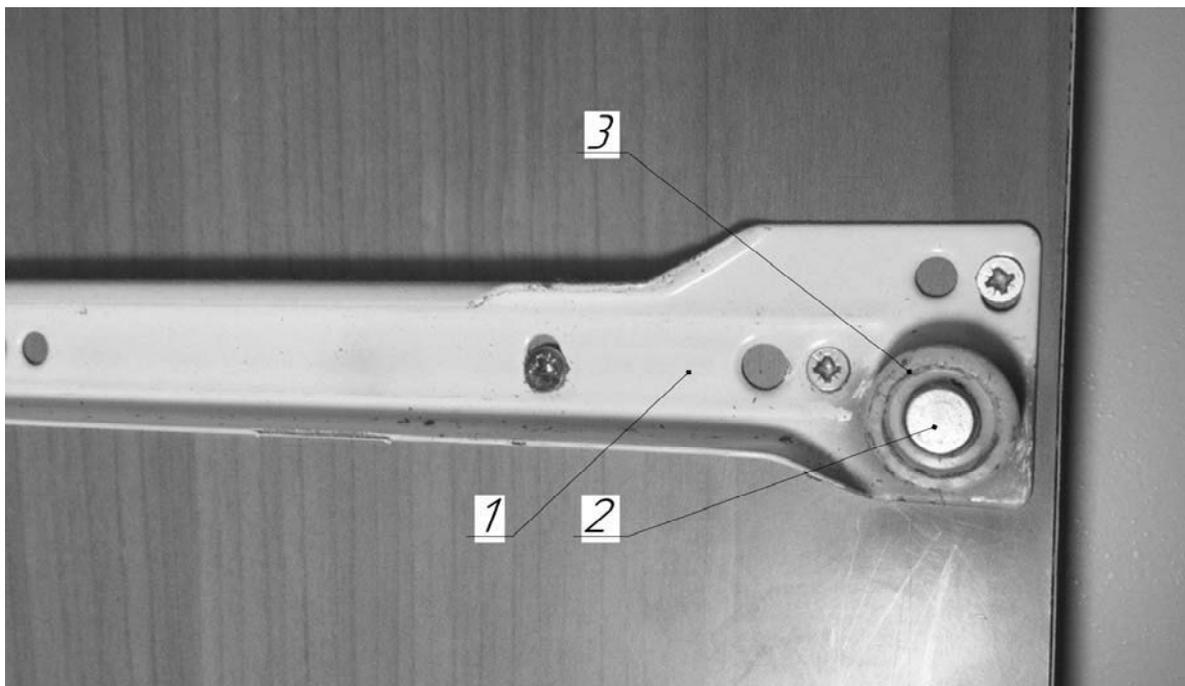


Рис. 2. Конструкция неподвижного компонента МПВЭКМ

Оборудование для проведения испытаний

Рассмотрены доступные материалы по испытательному оборудованию

Электротехника

для механизмов данного класса.

Обобщенная конструкция стендов для проведения испытаний МВЭКМ имеет следующие характеристики:

– тип электропривода (или друго-

го привода, например, пневматического цилиндра, гидравлического цилиндра, их комбинаций);

– способ нагружения (создания механического момента), возможно использование электропривода (или другого привода, например пневматического цилиндра, гидравлического цилиндра, их комбинаций);

– методика проведения испытаний;

– способ регистрации параметров рабочей диаграммы и т. д.;

– способ реализации рабочей

диаграммы и т. д.

На сегодняшний день известна конструкция такого оборудования, которая имеет защиту интеллектуальной собственности, патент на полезную модель RU 183864 [3], основные положительные и отрицательные стороны технического решения по данному патенту рассмотрены в [4].

Стенд для испытания конструкций или сооружений на вибрацию, ударные нагрузки представлен на рис. 3.

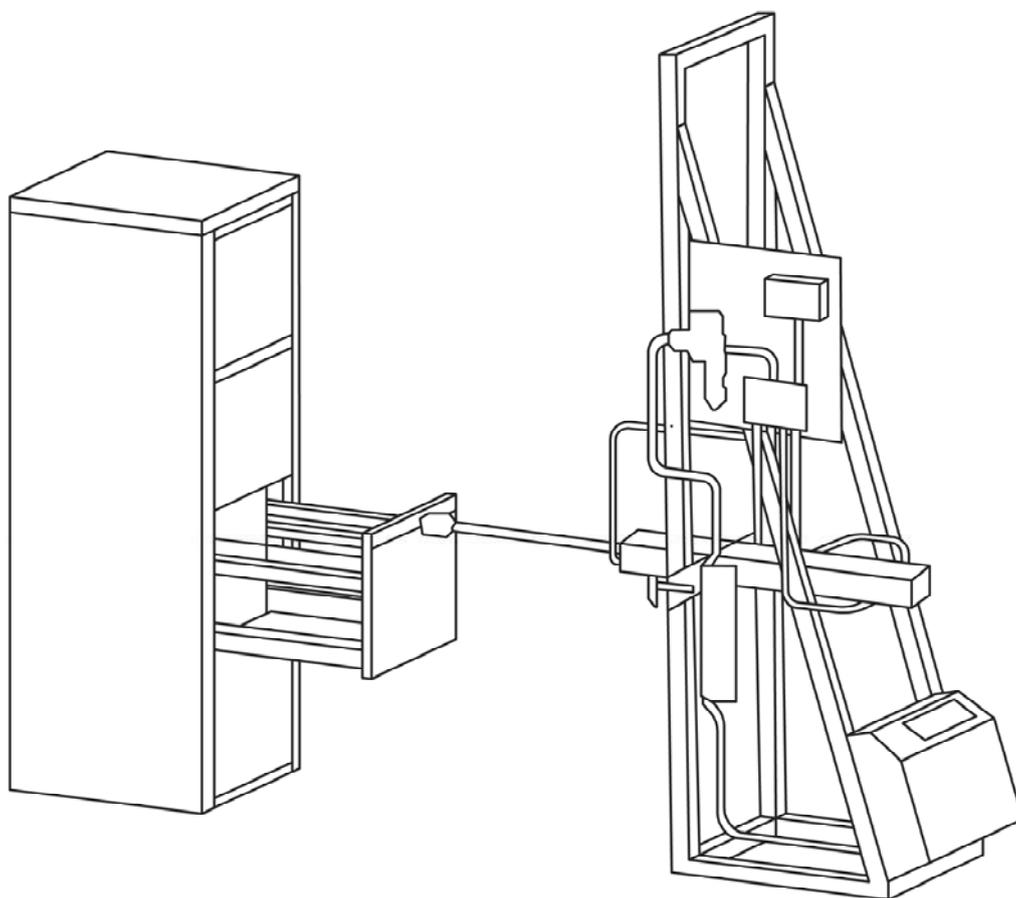


Рис. 3. Стенд для испытания конструкций или сооружений на вибрацию, ударные нагрузки

Полезная модель относится к области испытаний раздвижных изделий, а более конкретно – к стендам для ресурсных испытаний раздвижных (телескопических) направляющих выдвижных, например картотечных, ящиков.

Стенд для ресурсных испытаний направляющих выдвижных ящиков содержит основание и закрепленную на основании пространственную раму, на которой закреплен силовой привод и блок управления. При этом силовой

привод закреплен с возможностью изменения высоты своей установки и выполнен в виде пневмоцилиндра, шток которого выполнен с возможностью осуществления возвратно-поступательного рабочего движения, причем на штоке пневмоцилиндра установлена муфта крепления к выдвигному ящику, устанавливаемому на направляющих, подлежащих испытаниям. Блок управления включает в себя датчики регулирования рабочего хода штока пневмоцилиндра и счетчик открытий ящика, связан пневмомагистралями с пневмоцилиндром и через фильтр очистки воздуха с компрессором, закрепленным на пространственной раме.

Недостатки изделия: отсутствие на рынке; отсутствие конструкторской документации (КД); невозможность расчета точности работы исполнительного механизма и полноты выполняемых функций; недоступность КД и наличие признаков проприетарности; высокая цена по предварительным расчетам на закупку материалов и оборудования; необходимость наличия источника сжатого воздуха.

Существенными недостатками данного стенда являются:

- отсутствие плавного «затухания движения», т. е. возможности формирования диаграммы движения с различными значениями производной линейной скорости как в начале пути, так по его завершению для исполнительного механизма;

- отсутствие возможности автоматического формирования программы испытаний, т. е. невозможно программно задавать количество циклов;

- отсутствие возможности регулирования значения линейной скорости поступательно-возвратного движения в заданном диапазоне для исполнительного механизма;

- отсутствие возможности регулирования времени операций цикла прохождения исполнительного механизма с начального в конечное положение;

- отсутствие возможности автоматического построения рабочей диаграммы;

- недостаточно высокая точность регистрации динамических нагрузок;

- отсутствие контроля температуры роликов направляющих в процессе испытаний;

- отсутствие возможности автоматического формирования отчетов по результатам испытаний.

Перечисленные недостатки ограничивают возможность проведения испытаний с регистрацией текущего значения и изменений физических параметров в реальном времени, отсутствует возможность выбора других трендов рабочих движений на стенде для выполнения конкретного алгоритма действий. Кроме того, вышеуказанная конструкция разработана на основе дорогих импортных комплектующих, что не соответствует направлению на импортозамещение.

Рассмотрим образцы, которые присутствовали ранее на рынке.

Прибор для испытания на выносливость выдвигных ящиков SM002T Drawer Long-term Test Stand (рис. 4) предназначен для проведения длительных и отдельных испытаний выдвигных ящиков либо их деталей.

Основные механические параметры задаются изменением высоты, нагрузки и положением рабочей оси для выполнения различных испытаний. Специальный испытательный цилиндр с ходом поршня 800 мм обеспечивает испытания всех типов выдвигных ящиков. Оператор разрабатывает процедуры испытания в соответствии со своими потребностями, использует меню сенсорной панели управления.

Недостатки изделия: высокая цена; большой срок изготовления и доставки (более двух месяцев); санкции ЕС; proprietary software; отсутствие возможности получения отдельных узлов и запасных частей ввиду их проприетарности.

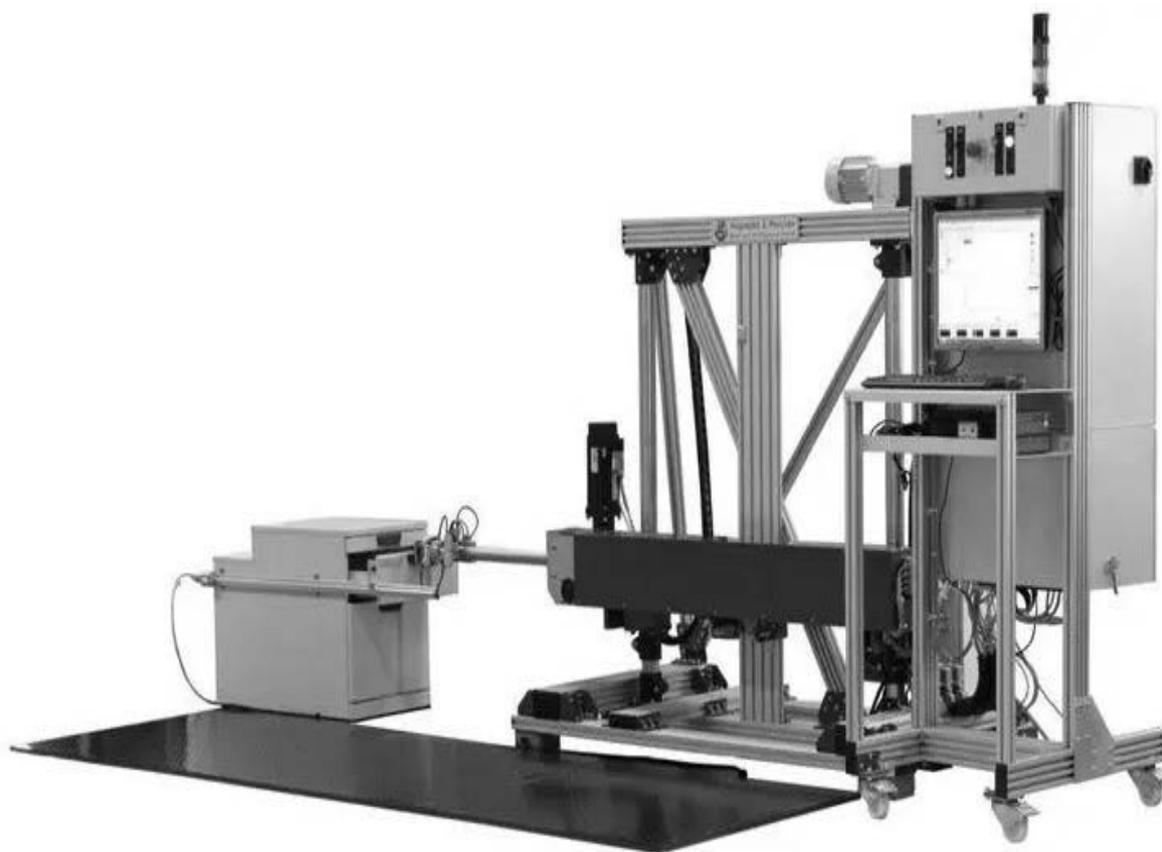


Рис. 4. Прибор для испытания на выносливость выдвижных ящиков SM002T Drawer Long-term Test Stand

Стенд для испытания мебели SM 25.07 (рис. 5) предназначен для проведения испытаний мебели на выдвигание ящиков и проведения испытаний для петель с вертикальной и горизонтальной осями вращения, проведения испытаний на долговечность опор качения и поворотных опор стульев на металлическом каркасе.

Недостатки изделия: функциональная избыточность; высокая цена; невозможность вывода графической информации; невозможность отслеживания трендов и пиковых значений нагрузки на тестируемом изделии, температуры и вибрации отдельных элементов и конструкции в целом.

Устройство испытания долговечности направляющих выдвижных ящиков Hegewald & Perschke представлено на рис. 6.

Недостатки изделия: высокая це-

на; большой срок изготовления и доставки (более двух месяцев); санкции ЕС; proprietary software; отсутствие возможности получения отдельных узлов и запасных частей ввиду их проприетарности.

Стенд проверки дверей и ящиков (рис. 7) предназначен для испытаний на долговечность открывающихся, раздвижных мебельных дверей, выдвижных ящиков корпусной мебели в соответствии с ГОСТ 28105–89, ГОСТ 19195–89, ГОСТ 28102–89.

Недостатки изделия: функциональная избыточность; высокая цена; невозможность вывода графической информации; невозможность отслеживания трендов и пиковых значений нагрузки на тестируемом изделии, температуры и вибрации отдельных элементов и конструкции в целом.

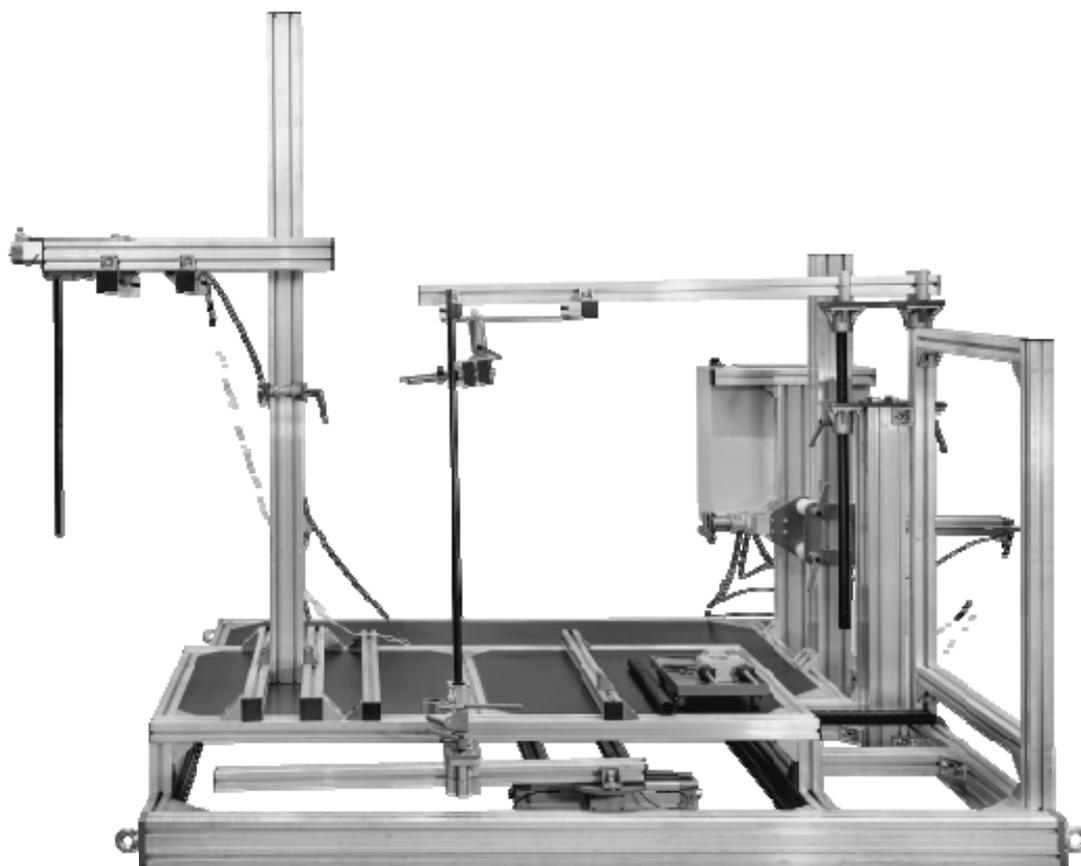


Рис. 5. Стенд для испытания мебели SM 25.07

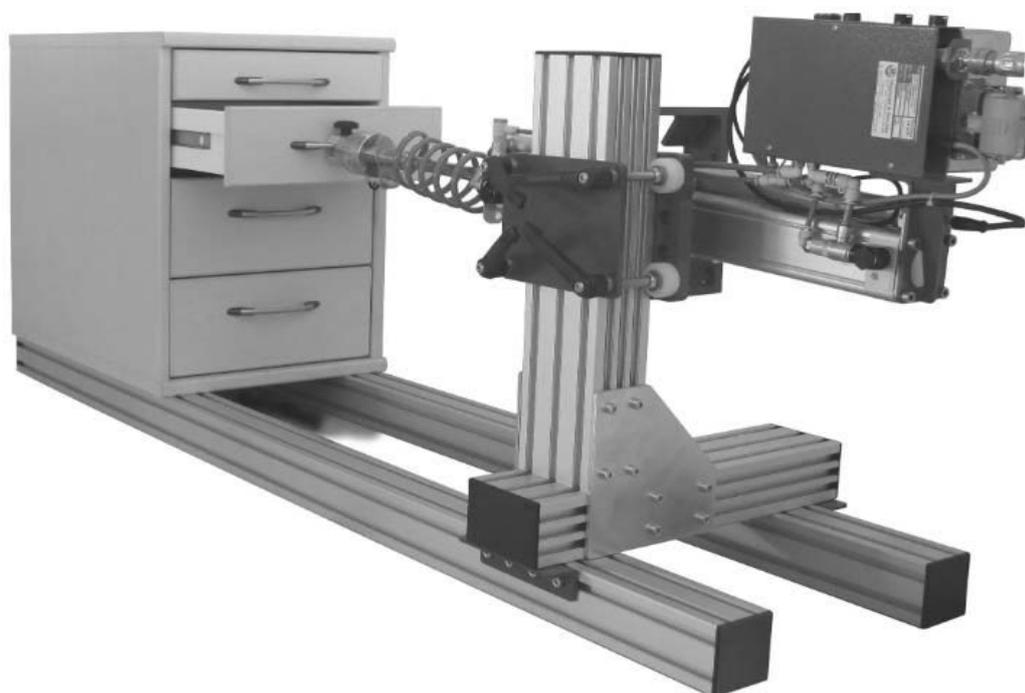


Рис. 6. Устройство испытания долговечности направляющих выдвижных ящиков Hegewald & Perschke



Рис. 7. Стенд проверки дверей и ящиков

На разработанном новом испытательном оборудовании будут реализованы следующие возможности:

- контроль изменения динамических характеристик МПВЭКМ;
- контроль температуры нагрева роликов направляющих МПВЭКМ;
- изменение скорости поступательно-возвратного движения в заданном технологическом диапазоне, т. е. формирование различных трендов по линейной скорости для МПВЭКМ;
- изменение высоты рабочей зоны;
- изменение диапазона поступательно-возвратного движения;
- установка количества циклов программы испытаний;
- мониторинг и регистрация изменения динамических параметров

МПВЭКМ в реальном времени с автоматическим формированием отчетов.

Для проведения испытаний МПВЭКМ данного типа выполнены НИР и ОКР, результатом которых стал новый испытательный комплекс (рис. 8).

В состав испытательного комплекса входят следующие элементы (рассматриваются только основные элементы электрооборудования): микропроцессорная система управления; автоматизированный электропривод (АЭП); датчики координат АЭП и объекта испытаний; блок питания и др.

В конструкции испытательного комплекса условно можно выделить электромеханическую подсистему (электродвигатель, датчики координат АЭП и т. д.) и станцию управления, в которой

размещены панель оператора, ПЛК, ПЧ, преобразователи сигналов, элементы управления и индикации и другие эле-

менты схемы электрической принципиальной (СЭП).

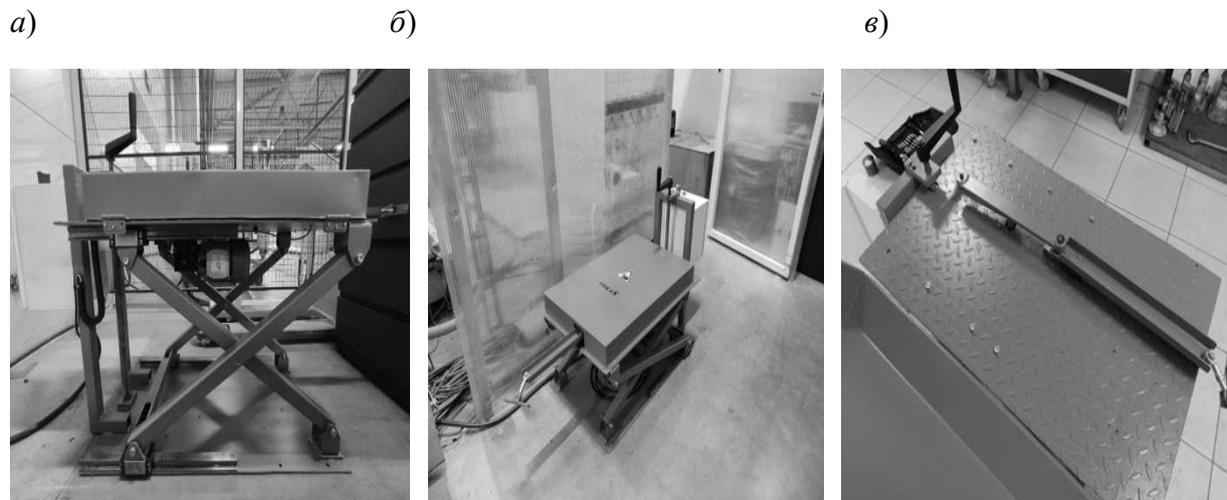


Рис. 8. Конструкция испытательный комплекса: а – вид спереди; б – вид сверху; в – вид сверху со снятой крышкой

Методика испытаний

Опытная эксплуатация нового испытательного комплекса (см. рис. 8) проводилась в лаборатории LLC «NOVUS INDUSTRY».

Методика испытаний соответствовала ГОСТ 28105–89 с дополнениями по ГОСТ 28102–89, ГОСТ 16371–2014, ГОСТ 22046–2016.

По требованиям различных ГОСТов количество циклов перемещений при испытании элементов мебели (ящики и др.) с МПВЭКМ – до 80 000.

Элементы мебели (ящики и др.) с МПВЭКМ считают выдержавшими испытания, если полученные при испытаниях показатели усилия выдвигания, прочности и долговечности испытанного образца будут соответствовать техническим характеристикам производи-

телей и ГОСТам.

Результаты испытаний

МПВЭКМ отработали полный объем испытаний без замечаний, сохранив после испытаний свою работоспособность и технические характеристики (рис. 9, а), ролик потерял в процессе испытаний свою работоспособность и технические характеристики (рис. 9, б) – недопустимый износ.

Заключение

В результате опытной эксплуатации новый испытательный комплекс обеспечил все заявленные характеристики и пригоден к использованию заинтересованными предприятиями и организациями.

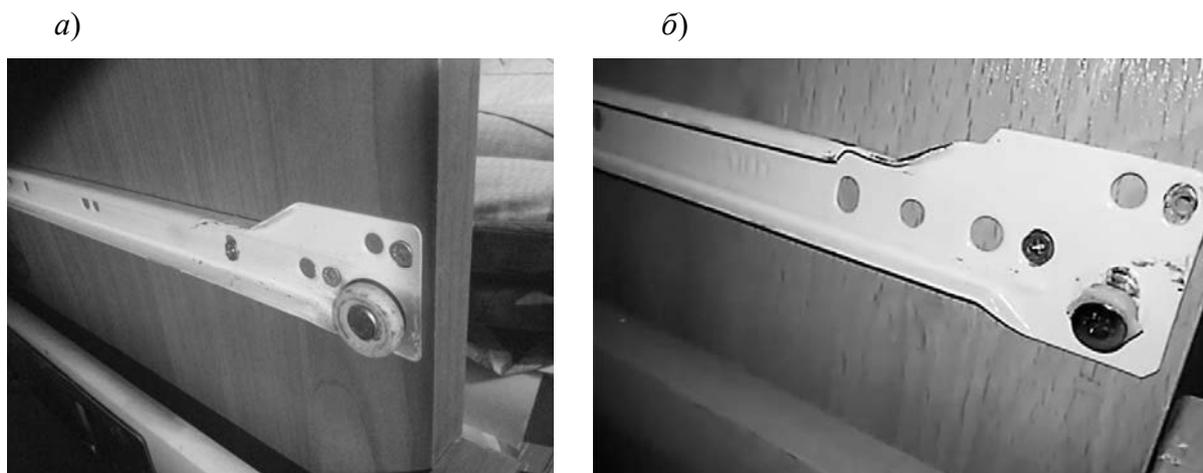


Рис. 9. МПВЭКМ после испытаний: а – соответствует; б – не соответствует

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Общество с ограниченной ответственностью «Новус Индустри» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://novusbel.by/wp-content/uploads/2023B2%D1%83%D1%81.pdf>. – Дата доступа: 13.08.2023.
2. Общество с ограниченной ответственностью «Производственное Объединение ОВЕН» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rusprofile>. – Дата доступа: 13.08.2023.
3. Стенд для ресурсных испытаний направляющих выдвижных ящиков [Электронный ресурс]: пат. RU 183864 / Е. В. Петров. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38158225>. – Дата доступа: 13.08.2023.
4. **Синюкович, А. А.** Разработка нового испытательного оборудования для комплектующих изделий производства ИООО «ВМГ ИНДУСТРИ» / А. А. Синюкович // 59 студенч. науч.-техн. конф. Белорус.-Рос. ун-та. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2023. – С. 159–160.

Статья сдана в редакцию 14 августа 2023 года

Контакты:

emos@rambler.ru (Леневский Геннадий Сергеевич);
pz61@mail.ru (Синюкович Андрей Александрович);
chnip@mail.ru (Шнип Денис Викторович).

G. S. LENEVSKY, A. A. SINIUKOVICH, D. V. SHNIP

DEVELOPING NEW TESTING EQUIPMENT FOR OOO NOVUS INDUSTRY PRODUCTS BASED ON ELECTRICAL EQUIPMENT PRODUCED BY OOO OVEN

Abstract

The paper considers various aspects of creating specialized testing equipment, substantiates the requirements and technical recommendations for structural elements of the electrical equipment and testing specifics. An electrical schematic diagram has been developed, a prototype has been manufactured, and testing has been carried out in the production environment at OOO NOVUS INDUSTRY.

Keywords:

automated electric drive, algorithm, sensors, controlling, mechanism for moving retractable furniture elements, OOO NOVUS INDUSTRY, OOO OVEN.

For citation:

Lenevsky, G. S. Developing new testing equipment for OOO NOVUS INDUSTRY products based on electrical equipment produced by OOO OVEN / G. S. Lenevsky, A. A. Siniukovich, D. V. Shnip // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 3 (80). – P. 134–143.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

DOI: 10.53078/20778481_2023_3_144

УДК 621.791

С. В. БОЛОТОВ, канд. техн. наук, доц.

К. В. ЗАХАРЧЕНКОВ, канд. техн. наук

В. П. КУЛИКОВ, д-р техн. наук, проф.

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ДУГОВОЙ СВАРКИ

Аннотация

Приведено описание функциональных возможностей, структуры, аппаратной части и программного обеспечения автоматизированной системы контроля качества дуговой сварки. Представлены результаты производственных испытаний автоматизированной системы.

Ключевые слова:

автоматизированная система, дуговая сварка, контроль качества, регистратор, паспорт сварного шва.

Для цитирования:

Болотов, С. В. Автоматизированная система контроля качества дуговой сварки / С. В. Болотов, К. В. Захарченков, В. П. Куликов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 3 (80). – С. 144–152.

Введение

Одной из основных задач предприятий и организаций, выполняющих сварочные работы, является повышение качества сварных соединений. Обеспечить качественное выполнение сварочных работ возможно при выполнении следующих условий.

1. Соблюдение технологии сварки [1].
2. Квалифицированный персонал (сварщики, руководители сварочных работ).
3. Сертифицированное (аттестованное) сварочное оборудование.
4. Сертифицированные сварочные материалы.

Отдельные производители сварочного оборудования выпускают системы контроля и документирования процесса сварки: WeldQAS фирмы ESAB, Q-Data

фирмы Lorch, WeldEye фирмы Kemppi, Weld Cube фирмы Fronius [2–5]. Российские производители также предлагают системы регистрации сварочных процессов. Фирма ИТС выпускает регистратор сварочных процессов РСР-102Д, а компания EVOSPARK комплектует свои сварочные аппараты системой Weldweb [6, 7]. Все вышеперечисленные системы предоставляют данные о параметрах процесса сварки, но в них отсутствует возможность контроля качества сварочных работ и документального его подтверждения. К недостаткам существующих систем относится их высокая стоимость, закрытый код, не позволяющий гибко перестроить систему под конкретное сварочное производство организации.

Описание автоматизированной системы

В Белорусско-Российском университете разработана автоматизированная система контроля качества дуговой сварки, предназначенная для контроля за соблюдением технологии при производстве сварочных работ на объектах повышенной опасности, документального подтверждения отсутствия отступлений от режимов сварки согласно утвержденным технологиям, учету персонала (сварщиков, руководителей сварочных работ, контролеров), учету сварочного оборудования, сварочных материалов, формированию отчетов о работе сварщиков и сварочного оборудования.

Функциональные возможности автоматизированной системы:

- радиочастотная идентификация сварщиков и сварочного оборудования позволяет проводить анализ качества дуговой сварки для каждого сварщика и каждой единицы сварочного оборудования;

- база данных инструкций на технологические процессы сварки, сварщиков, сварочного оборудования, материалов дает возможность оценивать влияние перечисленных факторов на качество дуговой сварки;

- получение с сервера заданий на сварку с рекомендуемыми диапазонами параметров режима обеспечивает автоматический контроль на регистраторе попадания параметров процессов дуговой сварки в диапазоны допустимых значений, прописанные в технологической инструкции на соответствующий сварной шов;

- регистрация сварочного тока, напряжения на дуге, температуры предварительного нагрева и температуры околошовной зоны дает возможность оценивать влияние параметров сварочных процессов на качество дуговой сварки;

- выдача звукового сообщения в

случае выхода сварщиком за границы рекомендуемых режимов сварки позволяет в реальном времени реагировать на отклонение параметров режимов сварки от допустимых значений и принимать меры по улучшению качества сварных соединений;

- передача данных о параметрах режима сварки на сервер дает возможность выявлять отклонения параметров процессов дуговой сварки от допустимых значений в реальном времени с задержкой на время передачи данных с регистраторов на сервер;

- формирование отчёта о выполненных сварочных работах, отчёта о режимах сварки, отчётов о работе сварщиков и сварочного оборудования;

- выставление комплексной оценки, характеризующей качество сварки, для каждого сварного шва обеспечивает мотивацию сварщиков к повышению качества выполнения дуговой сварки;

- формирование паспорта сварного шва с комплексной информацией о месте и времени проведения сварочных работ, наименовании и маркировке сварного соединения, руководителе и производителе сварочных работ (сварщике) с номерами документов, подтверждающих их квалификацию, о сварочном оборудовании и его сертификации, о наименовании и номерах партии сварочных материалов, наименовании и номерах технологического процесса и технологической инструкции с диапазонами рекомендуемых параметров режима сварки, о графиках, максимальных, минимальных и средних значениях сварочного тока, напряжения на дуге, температуре околошовной зоны, о комплексной оценке, характеризующей качество дуговой сварки.

Автоматизированная система содержит аппаратную и программную части (рис. 1).

Аппаратная часть автоматизированной системы представляет собой регистратор сварочных процессов (рис. 2),

который конструктивно состоит из основного блока, пульта сварщика и блока датчиков

датчиков [8].



Рис. 1. Структура автоматизированной системы контроля качества дуговой сварки



Рис. 2. Регистратор сварочных процессов РСП-БРУ-01: 1 – основной блок; 2 – пульт сварщика; 3 – блок датчиков

Основной блок располагается рядом со сварочным аппаратом и выполняет функции идентификации сварщика и сварочного оборудованию по удостоверению (брелоку) с радиочастотной меткой, выбор режима работы, обмен данными с сервером через GSM-модуль, сбор и обработку сигналов с датчиков. Пульт сварщика располагается непосредственно у места проведения сварочных работ и служит для переключения сварочных слоев, измерения температуры и влажности окружающего воз-

духа, контроля температуры предварительного нагрева и температуры околошовной зоны. На пульте сварщика расположена сирена, предупреждающая сварщика о выходе за рекомендованные технологическим процессом границы сварочного тока, напряжения на дуге и температуры. Блок датчиков служит для измерения мгновенных значений сварочного тока и напряжения с гальванической развязкой со сварочной цепью.

Технические характеристики регистратора приведены в табл. 1.

Табл. 1. Технические характеристики регистратора сварочных процессов РСП-БРУ-01

Наименование параметра	Значение
Входное напряжение блока (адаптера) питания	~220 В, 50 Гц
Напряжение питания регистратора	12 В
Частота сбора данных	10 кГц
Частота сохранения данных	10 Гц
Диапазон измерения сварочного тока	От 0 до 500 А
Погрешность измерения сварочного тока	±1,5 %
Диапазон измерения напряжения на дуге	От 0 до 100 В
Погрешность измерения напряжения на дуге	±1,5 %
Диапазон измерения температуры предварительного нагрева и околошовной зоны	От 0 °С до 380 °С
Погрешность измерения температуры предварительного нагрева и околошовной зоны	±5 °С
Канал передачи данных на сервер	GPRS
Способ идентификации сварщиков и оборудования	RFID 13,56 МГц
Объем энергонезависимой памяти	16 Гб
Габариты регистратора. Основной блок	395 × 175 × 120 мм
Габариты пульта сварщика	215 × 135 × 140 мм
Габариты блока датчиков	125 × 60 × 230 мм
Масса (регистратора, пульта сварщика, блока датчиков)	6,2 кг

Программная часть автоматизированной системы контроля качества дуговой сварки включает следующие основные модули [9, 10].

1. Модуль обработки данных с регистраторов, обеспечивающий формирование паспорта сварного соедине-

ния – основного документа, подтверждающего качество сварки, отчетов о работе оборудования и сварщиков, общего отчета за указанный период о соответствии качества сварных соединений технологическим инструкциям. Общий отчет за указанный период о со-

ответствии качества сварных соединений технологическим инструкциям позволяет выявить сварные соединения, по которым выявлены несоответствия, с целью дальнейших корректирующих действий. Контроль качества дуговой сварки каждого соединения автоматизированная система оценивает по усредненным с частотой 10 Гц значениям сварочного тока и напряжения на дуге. В случае выявления несоответствия сварщики выполняют необходимые действия по устранению дефектов сварки для обеспечения необходимого качества, после чего руководитель сварочных работ, мастер или контролер вносит соответствующие корректировки в паспорт сварного соединения.

2. Модуль обработки данных о сотрудниках, предназначенный для ввода данных о сварщиках, руководителях сварочных работ (мастерах) и контролерах, обеспечивает повышение качества дуговой сварки за счет учета прохождения аттестации сотрудниками, реализации персональной ответственности каждого сварщика, руководителя сварочных работ (мастера) и контролера за качество каждого сварного соединения.

3. Модуль обработки данных о технологических процессах предназначен для регистрации технологических процессов и технологических инструкций, содержащих диапазоны допустимых контролируемых параметров сварки. На основании технологических инструкций в процессе автоматизированного контроля определяется соответствие или несоответствие качества сварных соединений допускам.

4. Модуль интеллектуального контроля сварочных работ предназначен для формирования оценки контроля качества сварного соединения на основании отклонения значений параметров сварочного процесса от среднего, максимального и минимального значения, прописанных в технологических инструкциях. В данном модуле реализова-

на интеллектуальная методика оценки качества сварного соединения.

Автоматизированная система контроля качества дуговой сварки реализована с использованием современных программных средств и технологий: библиотека React – для реализации пользовательского интерфейса системы; ASP. Net Core – для реализации основных функций обработки данных; PostgreSQL – для хранения данных; EntityFramework – для обмена данными между базой данных и функциями обработки данных; LabView – для сбора и обработки данных с регистратора сварочных процессов [11].

Результаты испытаний

Автоматизированная система прошла производственные испытания при ручной дуговой сварке контрольных образцов неповоротных стыков труб на производственной базе ПУ «Нефтепестрой». Сварка производилась аттестованными сварщиками на сертифицированном сварочном оборудовании TransPocket 2500 сертифицированными электродами LB-52 U.

Допуски на контролируемые параметры сварки для различных операционных технологических карт представлены в табл. 2.

На рис. 3 приведен фрагмент паспорта сварного шва при сварке корневого слоя неповоротного стыка труб 159 × 6 мм. Согласно операционной технологической карте НСС-ОТКС-РД-МН-159-6, контролю подвергалась температура предварительного нагрева области сварного соединения, которая не должна быть не ниже 50 °С, и сила сварочного тока, которая должна лежать в диапазоне 70...90 А при сварке корневого слоя и 80...120 А при сварке заполняющего/облицовочного слоя, напряжение на дуге при ручной дуговой сварке не нормируется, но подвергается контролю. Анализ паспорта сварного соединения показывает, что допуски на

контролируемые параметры соблюдены, длительных выходов за рекомендуемые границы не зафиксировано. Суммарная оценка 8,6 свидетельствует о высоком

качестве сварного соединения, что подтверждается макрошлифами сварного соединения (рис. 4). Дефектов в выполненном сварном шве не обнаружено.

Табл. 2. Допуски на контролируемые параметры

Номер прохода	Наименование слоя	Температура предварительного подогрева, °С		Сила тока, А		Напряжение на дуге, В		Скорость сварки, м/ч	
		min	max	min	max	min	max	min	max
Операционные технологические карты: НСС-ОТКС-РД-МН-89-5, НСС-ОТКС-РД-МН-114-5, НСС-ОТКС-РД-МН-159-6, НСС-ОТКС-РД-МН-219-6									
1	Корневой	50	–	70	90	–	–	–	–
2	Заполняющий/облицовочный	–	–	80	120	–	–	–	–
Операционные технологические карты: НСС-ОТКС-РД-МН-89-8, НСС-ОТКС-РД-МН-273-8									
1	Корневой	50	–	70	90	–	–	–	–
2	Заполняющий	–	–	80	120	–	–	–	–
3, 4	Облицовочный	–	–	80	120	–	–	–	–
Операционные технологические карты: НСС-ОТКС-РД-МН-89-11									
1	Корневой	50	–	70	90	–	–	–	–
2–4	Заполняющий	–	–	80	120	–	–	–	–
5–7	Облицовочный	–	–	80	120	–	–	–	–

Заключение

Автоматизированная система контроля качества дуговой сварки позволяет в режиме реального времени осуществлять мониторинг сварочного процесса на соответствие установленным технологической инструкцией параметрам режима сварки, своевременно предупреждать сварщика о выходе за рекомендованные границы режимов для предотвращения образования дефектов сварных соединений. Идентификация на регистраторе сварщика и сварочного оборудования позволяет исключить выполнение сварки неаттестованным пер-

соналом, а также на оборудовании, не прошедшем сертификацию. Система обеспечивает возможность учета сертифицированных сварочных материалов, используемых при выполнении дуговой сварки. Преимуществом автоматизированной системы перед аналогами является формирование итогового документа – паспорта сварного соединения, подтверждающего качество дуговой сварки. Контроль в реальном времени параметров сварочных процессов, аттестации персонала, сертификации сварочного оборудования и материалов обеспечивает повышение эффективности контроля качества дуговой сварки.

Показания сварочного тока по слою №1, А



Показания напряжения на дуге по слою № 1, В



Наименование параметра	Значение
Время начала сварки	10:33:51
Время окончания сварки	10:35:01
Суммарное время сварки, мин	01:10
Суммарное время длительного (св. 5 с) выхода параметров за пределы допустимых значений, мин	0

Наименование параметра	Значение			Обеспечение допуска
	минимальное	максимальное	среднее	
Температура предварительного подогрева, °С	—	—	55,1	Да
Сварочный ток, А	0,6	107,3	73,2	Да
Напряжение на дуге, В	4,1	64,2	20,7	Да
Оценка	8,6			

Рис. 3. Фрагмент паспорта сварного шва

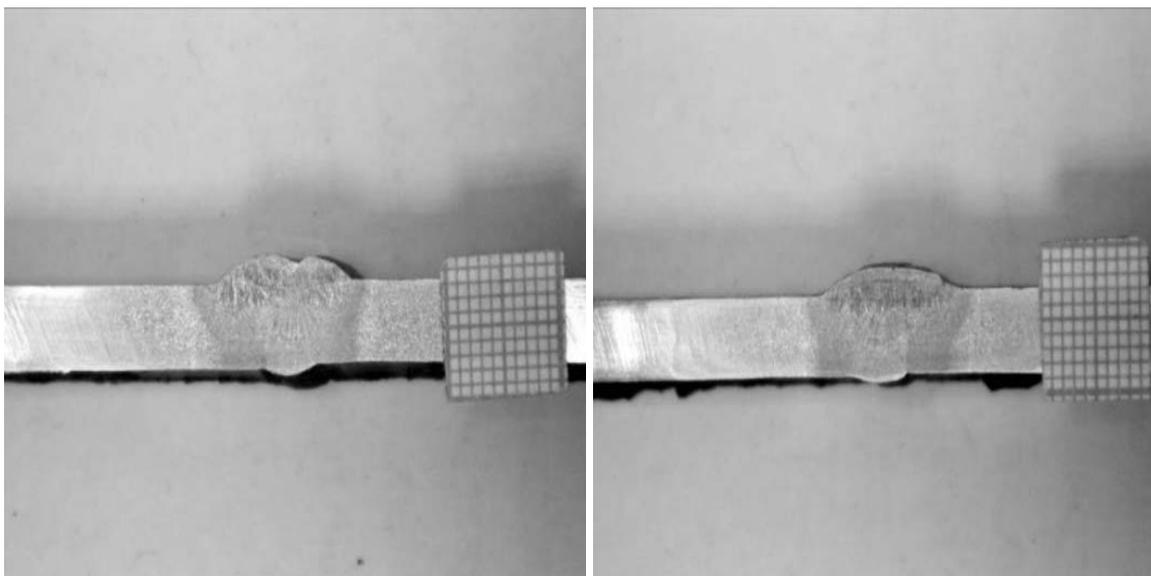


Рис. 4. Макрошлифы сварного соединения труба + труба 159 × 6

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Куликов, В. П.** Технология сварки плавлением и термической резки: учебник / В. П. Куликов. – 2 изд., стер. – Минск : Новое знание, 2018. – 416 с.
2. WeldQAS [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании ESAB. – Режим доступа: <https://www.esab.ru/ru/products/digital-solutions/quality-assurance/weldqas.cfm>. – Дата доступа: 29.06.2023.
3. Q-Data [Electronic resource] // Lorch Smart Welding. – Mode of access: <https://www.lorch.eu/en/productworld/q-data>. – Data of access: 15.06.2023.
4. WELDING MANAGEMENT SOFTWARE KEMMPI WELD EYE [Electronic resource] // KEMMPI OY Official Website. – Mode of access: <https://www.kemppi.com/en-US/offering/family/weldeye>. – Data of access: 16.06.2023.
5. WELDCUBE [Electronic resource] // Fronius Perfect Welding. – Mode of access: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/products/digital-products/digital-products/weldcube/weldcube-basic>. – Data of access: 19.06.2023.
6. Регистратор параметров сварочных процессов РСП-102Д [Электронный ресурс] // Инженерный и технологический центр. – Режим доступа: https://npfets.ru/catalog/ets/prochee/registratoru/registrator_parametrov_svarochnuh_processov_rsp_102d. – Дата доступа: 19.04.2023.
7. Система сетевого мониторинга Weld Web: выводим сварку на новый уровень [Электронный ресурс] // DeltaSVAR. – Режим доступа: <https://www.deltasvar.ru/biblioteka/novosti/523-2>. – Дата доступа: 20.04.2023.
8. **Болотов, С. В.** Регистратор параметров сварочных процессов РСП-БРУ-01 / С. В. Болотов // Современные проблемы машиностроения: сб. тр. XVI Междунар. науч.-техн. конф. – Томск: ТПУ, 2021. – С. 197–198.
9. Intelligent Welding Control System [Electronic resource] / S. V. Bolotov [et al.] // Russian Advances in Fuzzy Systems and Soft Computing: Selected Contributions to the 10th International Conference «Integrated Models and Soft Computing in Artificial Intelligence» (IMSC-2021), Kolomna, 17–20 May, 2021. – Kolomna, 2021. – Mode of access: <http://ceur-ws.org/Vol-2965/paper35.pdf>. – Data of access: 17.12.2021.
10. Концепция создания информационных систем автоматического контроля работы сварщиков / С. В. Болотов [и др.] // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте (ИММВ-2022): сб. науч. тр. XI Междунар. науч.-практ. конф., Коломна, 16–19 мая 2022 г.: в 2 т. – Коломна, 2022. – Т. 2. – С. 257–268.

11. Технология повышения эффективности контроля сварочных процессов в интеллектуальной системе WELDINGCONTROL / С. В. Болотов [и др.] // Энергетика, информатика, инновации – 2021: сб. тр. XI Междунар. науч.-техн. конф.: в 2 т. – 2021. – Т. 2. – С. 227–230.

Статья сдана в редакцию 14 июля 2023 года

Контакты:

s.v.bolotov@mail.ru (Болотов Сергей Владимирович);
zaharchenkovkv@mail.ru (Захарченков Константин Васильевич);
kafoitsp@gmail.com (Куликов Валерий Петрович).

S. V. BOLOTOV, K. V. ZAKHARCHENKOV, V. P. KULIKOV

AUTOMATED ARC WELDING QUALITY CONTROL SYSTEM

Abstract

Functional capabilities, structure, hardware and software of the automated arc welding quality control system are described. Results of production tests of the automated system are presented.

Keywords:

automated system, arc welding, quality control, recording system, welding seam passport.

For citation:

Bolotov, S. V. Automated arc welding quality control system / S. V. Bolotov, K.V. Zakharchenkov, V. P. Kulikov // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 3 (80). – P. 144–152.

DOI: 10.53078/20778481_2023_3_153

УДК 620.179.1

А. Н. СИНИЦА, канд. техн. наук, доц.

В. П. КУЛИКОВ, д-р техн. наук, проф.

М. А. СИНИЦА, канд. техн. наук

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ОСЕЙ ТРАМВАЙНЫХ ВАГОНОВ ДЕФЕКТΟΣКОПОМ УД2-102 «ПЕЛЕНГ»

Аннотация

Рассмотрены особенности ультразвукового контроля осей трамвайных вагонов без демонтажа и разборки колесной пары. Приведены результаты расчета механических напряжений оси трамвайного вагона при трогании вагона с места. Установлены наиболее нагруженные участки оси. По результатам расчетов разработана технология ультразвукового контроля осей трамвайных вагонов и даны основные параметры.

Ключевые слова:

ультразвуковой контроль, ось трамвайного вагона, стандартный образец.

Для цитирования:

Синица, А. Н. Ультразвуковой контроль осей трамвайных вагонов дефектоскопом УД2-102 «ПЕЛЕНГ» / А. Н. Синица, В. П. Куликов, М. А. Синица // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 3 (80). – С. 153–160.

Введение

Одной из ответственных деталей трамвайных вагонов с точки зрения безопасной их эксплуатации является ось колесной пары.

Периодический контроль осей трамвайных вагонов проводится во всех трамвайных депо. Используемые при этом методы неразрушающего контроля (НК), последовательность их выполнения аналогичны тем, что применяются в практике дефектоскопии деталей подвижного состава железнодорожного транспорта. Основными из методов НК являются ультразвуковой контроль эхометодом и магнитопорошковый.

До недавнего времени основным прибором, который использовался при акустическом контроле, являлся дефектоскоп УД2-12. Прибор надежен в эксплуатации, и при его грамотном применении достигается высокая чувствительность контроля, однако при этом

УД2-12 имеет ряд эксплуатационных недостатков, обусловленных, главным образом, устаревшей конструкцией дефектоскопа. Основными из этих недостатков являются низкая производительность контроля, связанная с длительной настройкой браковочной чувствительности при прозвучивании различных участков оси и замене пьезоэлектрических преобразователей, неудобства при определении координат дефекта, большие габариты и вес дефектоскопа.

В последние годы предприятия Республики Беларусь начали переоснащение своих лабораторий неразрушающего контроля на более совершенные акустические дефектоскопы, которые лишены недостатков прибора УД2-12. Наибольшее распространение получили такие дефектоскопы, как УД2-102 «ПЕЛЕНГ» российской фирмы «АЛТЕК» и USN-52 немецкой фирмы KRAUTKRAMER.

Указанные приборы за счет наличия встроенного процессора и жидкокристаллического дисплея позволяют хранить в памяти более 100 вариантов настройки дефектоскопа на различные зоны контроля или изделия, эффективно отсекают шумы, быстро, без перенастройки прибора, переходить на другие режимы контроля и преобразователи, хранить результаты контроля на внешнем накопителе, распечатывать копию экрана на бумаге. На экране дефектоскопа, кроме привычной сигналограммы, отображаются параметры выявленного дефекта, режимы контроля и др. Габариты и вес приборов в несколько раз ниже, чем у УД2-12.

В работе описываются особенности акустического контроля осей трамвайных вагонов дефектоскопом УД2-102 «ПЕЛЕНГ» на основе опыта ультразвуковой дефектоскопии трамваев в г. Мозыре.

Расчет механических напряжений в оси трамвайного вагона

Как отмечалось выше, технология ультразвукового контроля осей вагонов трамваев в целом аналогична контролю осей железнодорожных вагонов [1]. Однако с учетом различий в конструкциях осей трамваев и железнодорожных осей, отличий в схемах их нагружения контроль осей трамваев имеет свои особенности.

Ось трамвайного вагона работает в сложно нагруженных условиях при переменных нагрузках, и наиболее опасным эксплуатационным дефектом является усталостная трещина. Наиболее вероятными участками возникновения трещин являются те участки оси, в которых значения механических напряжений максимальны. Для определения этих участков был проведен расчет напряженно-деформированного состояния оси при различных схемах нагру-

жения (трогании трамвая с места, торможении, движении трамвая по криволинейному участку и т. д.).

На рис. 1 представлен эскиз оси в сборе с основными деталями, передающими ей механические нагрузки. На крайние подступичные части оси 1 напрессованы ступицы колес 2. К ним крепятся колеса (на рис. 1 не показаны), которые опираются на рельсы. С внутренних сторон ступиц колес расположены роликовые подшипники, на которые опирается кузов вагона (внутренние кольца подшипников обозначены цифрой 3). В центральной части на ось напрессована ступица зубчатого колеса 4. К ней крепится зубчатое колесо (на рис. 1 не показано), которое передает оси вращательное движение.

Схема нагружения оси при трогании трамвая изображена на рис. 2. Ось трамвая испытывает изгиб от сосредоточенных сил F от веса вагона, а также кручение, обусловленное крутящим моментом M от редуктора двигателя. Ступицы колес неподвижны.

Расчет возникающих в оси механических напряжений проводился с использованием метода конечных элементов, реализованного в программном комплексе SolidWorksSimulation.

Модель с приложенными нагрузками представлена на рис. 3. На внутренние кольца роликовых подшипников действует пара сил F . К ступице зубчатого колеса приложен крутящий момент M . Ступицы колес (на рис. 3 не показаны) неподвижно закреплены.

Результаты расчетов

Результаты расчета механических напряжений оси трамвайного вагона представлены на рис. 4 в виде распределения цветовых градаций на поверхности оси (см. рис. 4, *а*), в ее продольном сечении (см. рис. 4, *б*), под ступицами колеса и кольцами роликового подшип-

ника с короткой (см. рис. 4, в) и длинной (см. рис. 4, г) частей оси, а также под ступицей зубчатого колеса

(см. рис. 4, д). Красные участки соответствуют максимальным значениям напряжений, синие – минимальным.

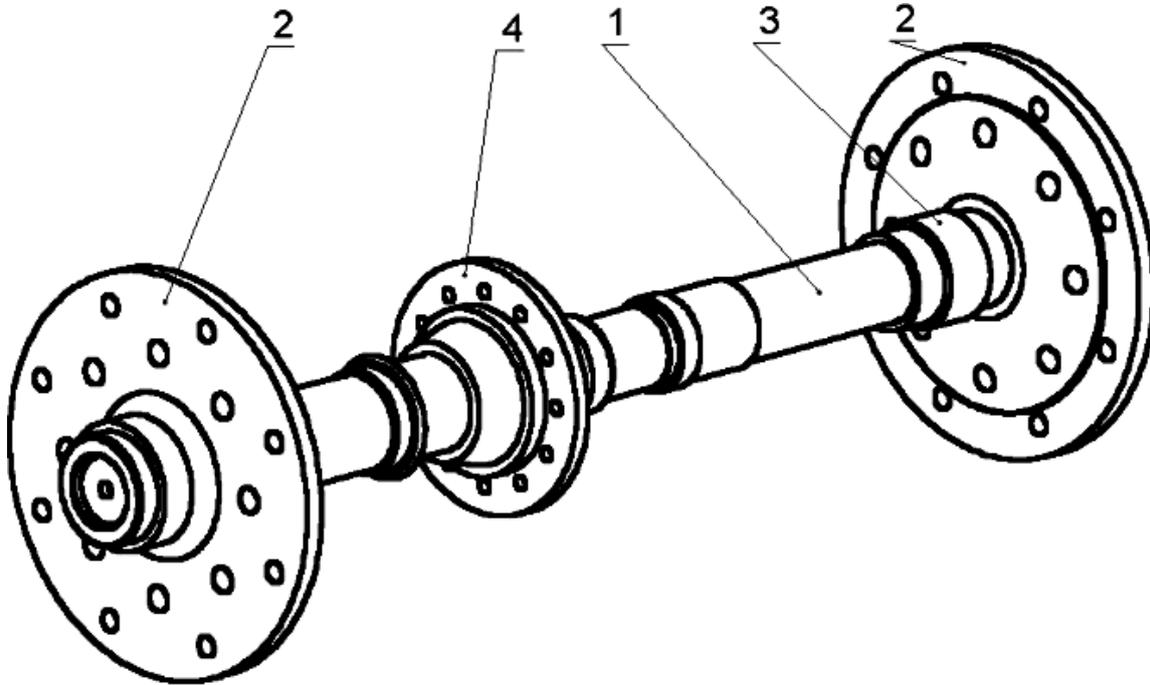


Рис. 1. Эскиз оси трамвайного вагона в сборе: 1 – ось трамвайного вагона; 2 – ступицы колес; 3 – кольца роликовых подшипников; 4 – ступица зубчатого колеса

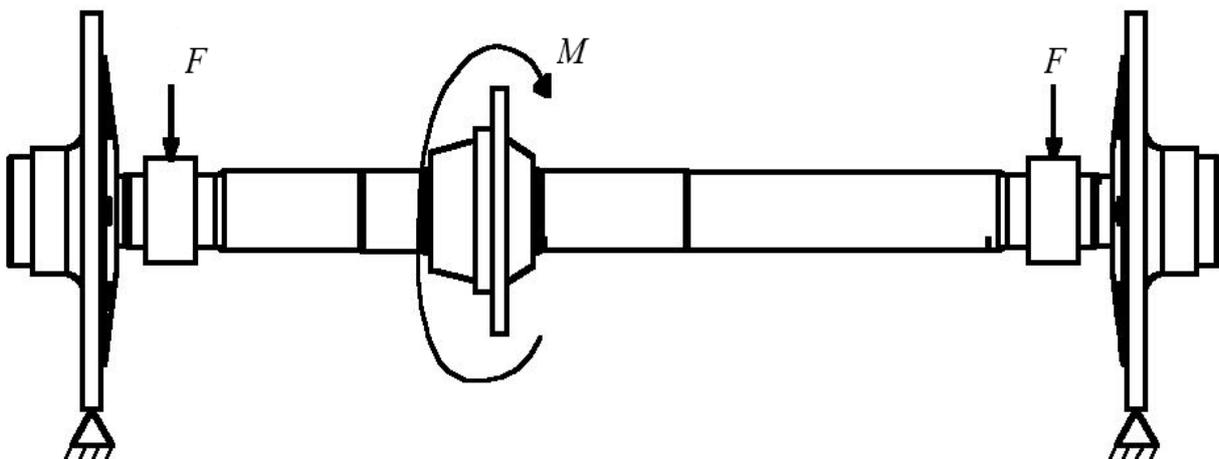


Рис. 2. Схема нагружения оси трамвайного вагона

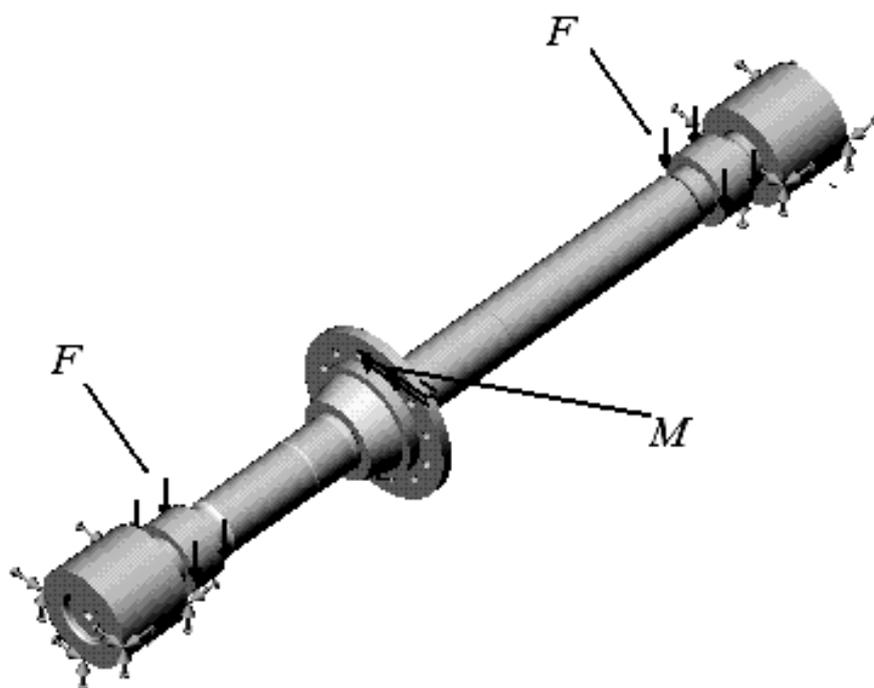


Рис. 3. Расчетная модель нагружения оси трамвайного вагона

Приведенные на рис. 4 данные отражают только качественную картину распределения механических напряжений в нагруженной оси при трогании трамвайного вагона с места. Тем не менее информация о наиболее нагруженных участках оси полезна при разработке технологии неразрушающего контроля.

Как видно из рис. 4, наибольших значений напряжения достигают под краями ступиц колес и роликовым подшипником в короткой части оси (до 200 МПа). Несколько меньшего значения (до 130 МПа) – на аналогичных участках длинной части оси между ступицей зубчатого колеса и роликовым подшипником. На участке зубчатого колеса (см. рис. 4, *д*) со стороны короткой части оси значения напряжений также больше, чем с длинной стороны (соответственно 150 и 130 МПа).

Разница в величине напряжений на короткой и длинной частях оси объясняется тем, что зубчатое колесо рас-

положено несимметрично по длине оси.

Таким образом, участками оси, в которых наиболее вероятно возникновение усталостных трещин, являются участки под ступицами колес и под роликовыми подшипниками, а также участки между ступицами колес и роликовыми подшипниками. Кроме того, контролировать следует и участки под краями ступицы зубчатого колеса и в обе стороны от них на расстоянии 50...70 мм.

Использование результатов расчетов механических напряжений в оси трамвайного вагона при разработке технологии ультразвукового контроля

По результатам расчетов была разработана технология ультразвукового контроля осей трамвайных вагонов с торцов оси без демонтажа и разборки колесной пары.

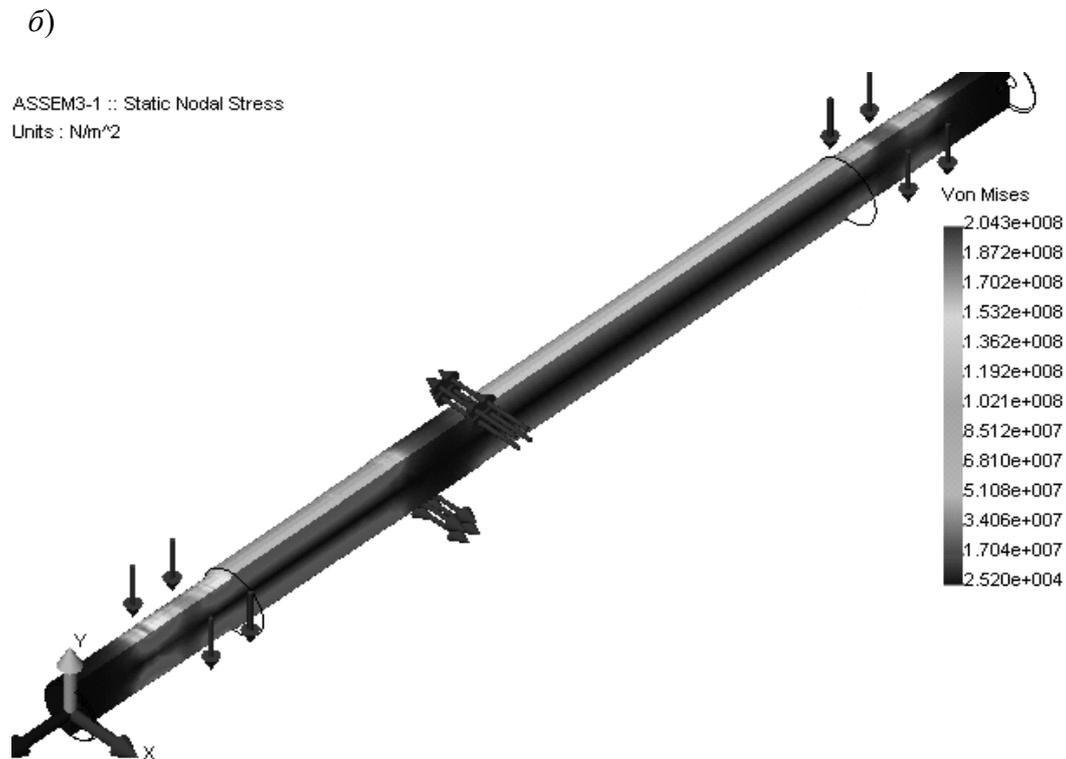
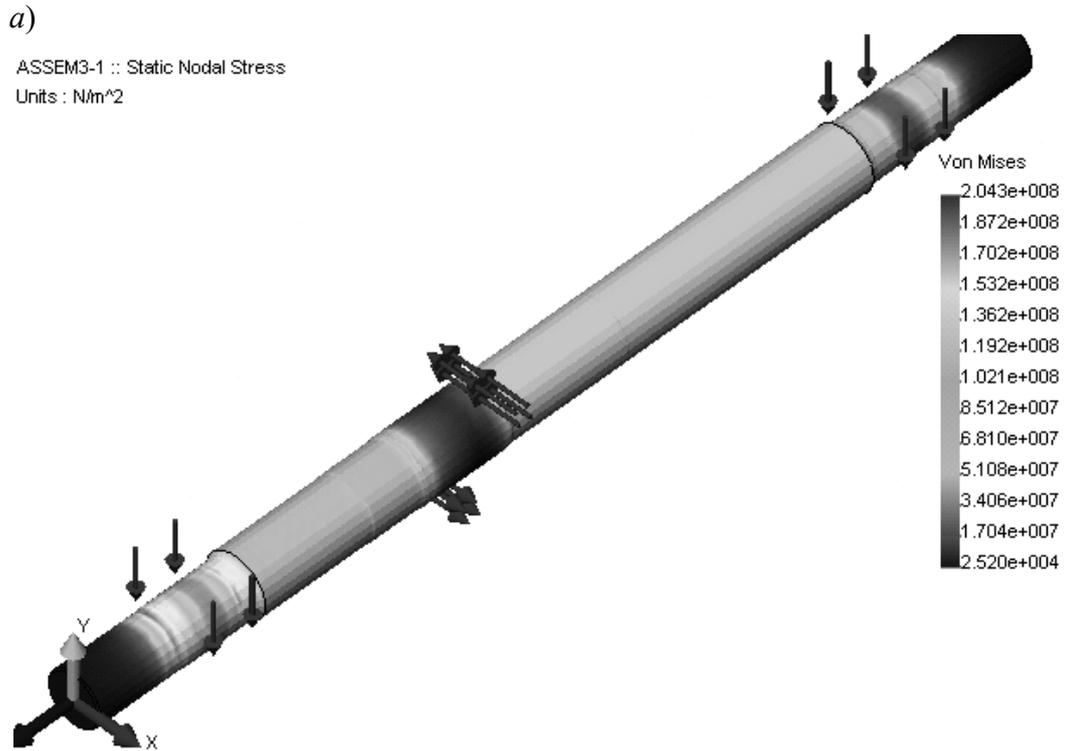
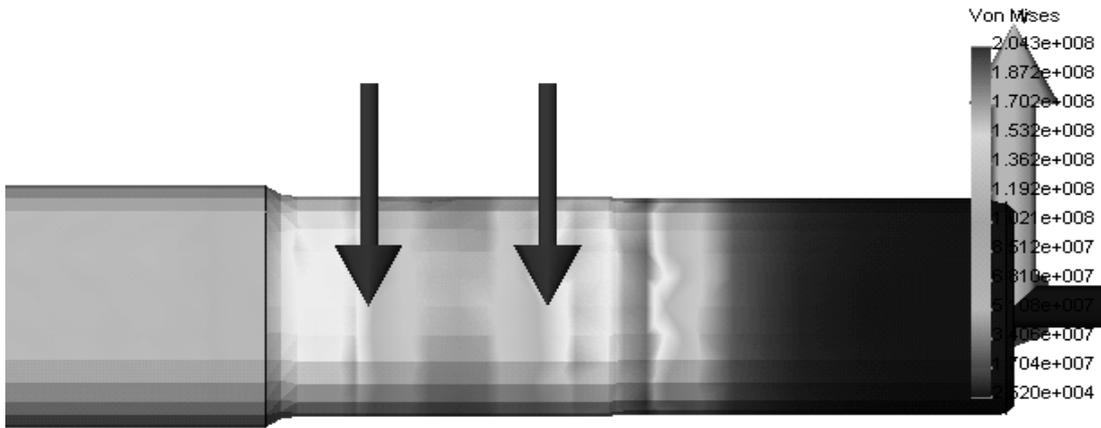


Рис. 4. Распределение механических напряжений в нагруженной оси трамвайного вагона: *a* – на поверхности оси; *б* – в продольном сечении оси; *в* – под ступицами колеса и кольцами роликового подшипника с короткой части оси; *г* – под ступицами колеса и кольцами роликового подшипника с длинной части оси; *д* – под ступицей зубчатого колеса

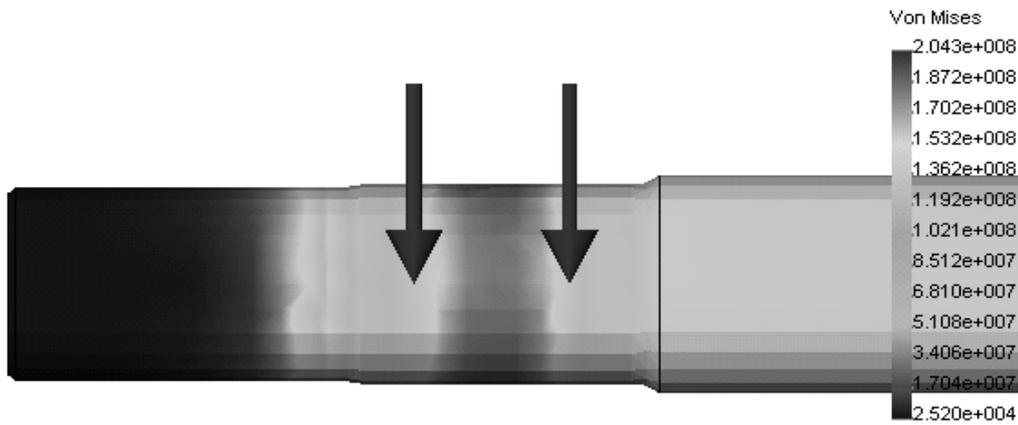
в)

ASSEM3-1 :: Static Nodal Stress
Units : N/m²



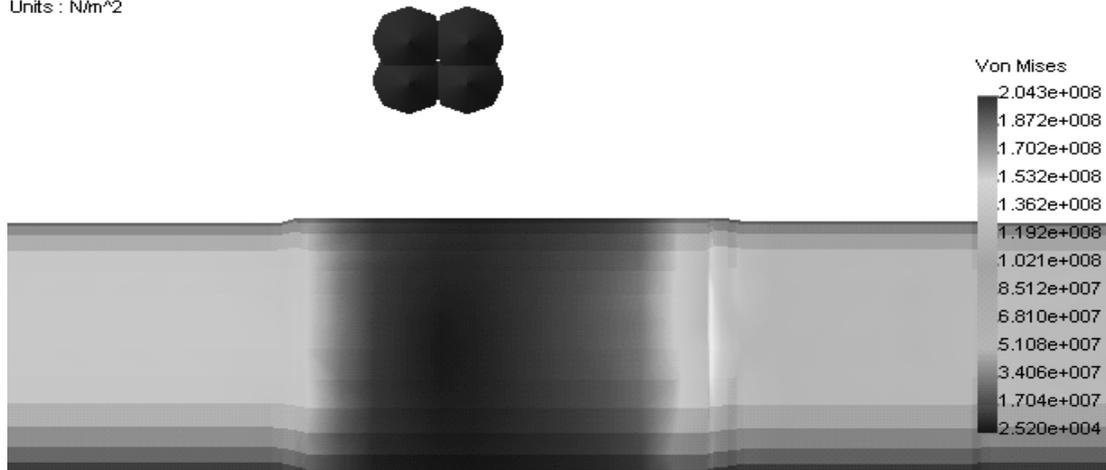
г)

ASSEM3-1 :: Static Nodal Stress
Units : N/m²



д)

ASSEM3-1 :: Static Nodal Stress
Units : N/m²



Окончание рис. 4

Процесс ультразвукового контроля оси проводится в несколько последовательных этапов. На каждом этапе контролируется определённая часть оси (зона). Каждая зона условно разделена на несколько диапазонов, в пределах которых наиболее вероятно возникновение эксплуатационных дефектов (усталостных трещин).

Для каждой зоны контроля следует применять свои схемы прозвучива-

ния, масштаб развёртки, эталонные отражатели и значения браковочной чувствительности.

Зоны контроля оси представлены на рис. 5. Размеры зон и диапазонов, расположение эталонных отражателей в стандартном образце выбраны с учетом результатов расчетов, описанных выше. Для исключения пропуска непроизводимых участков оси зоны контроля взаимно перекрывают друг друга.

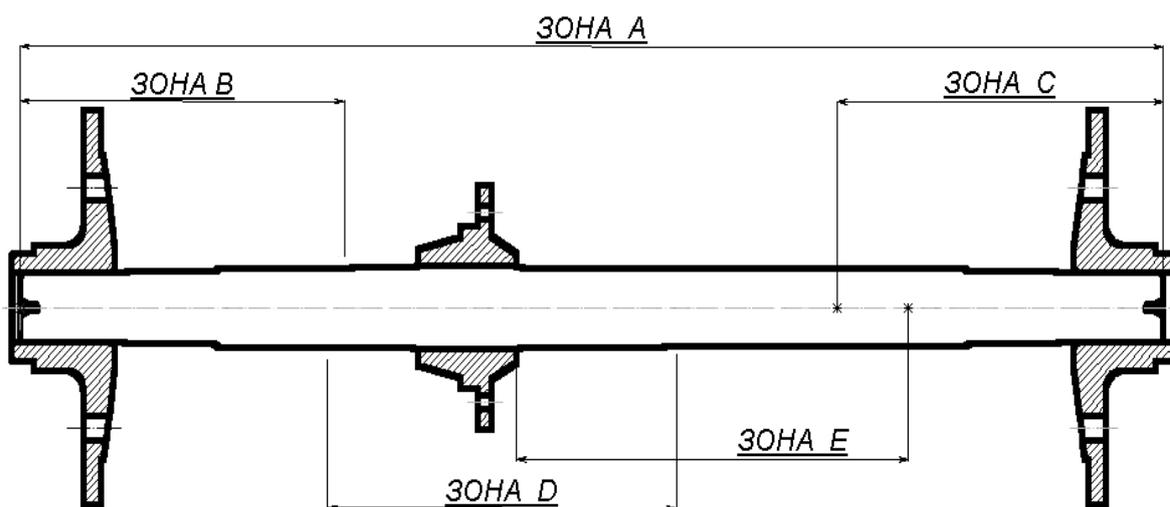


Рис. 5. Зоны контроля оси трамвайного вагона

Зона *A* – контролируется вся ось (контроль на прозвучиваемость).

Зоны *B*, *C* – контроль участков под ступицами колес.

Зоны *D*, *E* – контроль центральной части оси.

Для настройки акустического дефектоскопа используется стандартный образец предприятия (СОП) колесной пары с искусственными дефектами в виде узких поперечных прорезей в оси. Такие искусственные дефекты располагаются во всех зонах контроля в местах наиболее вероятного возникновения усталостных трещин [2]. Образец аттестован в установленном порядке.

Параметры контроля, полученные при прозвучивании соответствующих зон стандартного образца, записывают-

ся в память дефектоскопа в качестве настроек. Настройки создаются один раз. Перед проведением контроля каждой зоны нет необходимости перенастраивать прибор, достаточно только вызвать из памяти соответствующую настройку.

Заключение

Результаты расчета механических напряжений оси трамвайного вагона позволили установить наиболее нагруженные участки оси. Это участки под краями ступиц колес и роликовым подшипником, а также на участке зубчатого колеса в средней части оси. Именно здесь наиболее вероятно возникновение усталостных трещин.

Также установлено, что из-за несимметричности расположения зубчатого колеса по длине оси значения напряжений в короткой части оси превышают напряжения в длинной части. Причем эта разница увеличивается по мере удаления от зубчатого колеса. Слева и справа от зубчатого колеса значения напряжений составляют соответственно 150 и 130 МПа, а уже под ступицами колес – 200 и 130 МПа.

По результатам расчетов разработана технология ультразвукового контроля осей трамвайных вагонов и стандартный образец предприятия колесной пары с искусственными дефектами для настройки акустического дефектоскопа.

Методика контроля внедрена в трамвайном депо г. Мозыря. Использование дефектоскопа УД2-102 «ПЕЛЕНГ» позволило сократить время акустического контроля одной оси в 3 раза.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / В. В. Клюев [и др.]; под ред. В. В. Клюева. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Машиностроение, 2003. – 656 с.
2. Неразрушающий контроль: в 5 кн. Кн. 2: Акустические методы контроля: практическое пособие / Под ред. В. В. Сухорукова. – Москва: Высшая школа, 1991. – 283 с.: ил.

Статья сдана в редакцию 14 июля 2023 года

Контакты:

sinitsaan@gmail.com (Синица Александр Николаевич);

kafoitsp@gmail.com (Куликов Валерий Петрович);

masinitsa17@gmail.com (Синица Маргарита Анатольевна).

A. N. SINITSA, V. P. KULIKOV, M. A. SINITSA

ULTRASONIC INSPECTION OF TRAMWAY CAR AXLES WITH UD2-102 PELENG FLAW DETECTOR

Abstract

The features of ultrasonic testing of tramway car axles without dismantling and disassembling the wheelset are considered. The results of calculation of mechanical stresses of tramcar axle, when starting the tramcar, are given. The most loaded parts of the axle are determined. Based on the results of the calculations, the technology for ultrasonic testing of tramway car axles has been developed and its main parameters are presented in this paper.

Keywords:

ultrasonic testing, tramway car axle, reference material.

For citation:

Sinitza, A. N. Ultrasonic inspection of tramway car axles with UD2-102 PELENG flaw detector / A. N. Sinitza, V. P. Kulikov, M. A. Sinitza // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 3 (80). – P. 153–160.

ОХРАНА ТРУДА. ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ. ЭКОЛОГИЯ

DOI: 10.53078/20778481_2023_3_161

УДК 796.8

А. В. ЩУР¹, д-р биол. наук, доц.

А. А. АЛЕКСАНДРОНЕЦ¹

М. В. РОМАНОВ², канд. техн. наук, доц.

А. Н. ЧУСОВ², канд. техн. наук, доц.

¹Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

²Инженерно-строительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (Санкт-Петербург, Россия)

УСТРОЙСТВО ПО ОЧИСТКЕ ВОЗДУХА ЖИЛЫХ И ОФИСНЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

Аннотация

Предложена конструкция прибора для очистки воздуха, а также обоснована его эффективность по очистке воздуха помещений от микроорганизмов.

Ключевые слова:

устройство для очистки воздуха, конструкция, ультрафиолетовое обеззараживание, микроорганизмы.

Для цитирования:

Устройство по очистке воздуха жилых и офисных помещений / А. В. Щур, А. А. Александронец, М. В. Романов, А. Н. Чусов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 3 (80). – С. 161–167.

Введение

Атмосферный воздух необходим для жизнедеятельности людей, при этом любое его загрязнение неблагоприятно воздействует на самочувствие и состояние здоровья человека. Под термином «атмосферное загрязнение» следует понимать присутствие в воздухе различных газов и аэрозолей, которые неблагоприятно влияют на живые организмы, ухудшая их жизненные условия, и причиняют ущерб материальным ценностям. Постоянное поступление в орга-

низм человека загрязненного воздуха может привести к тяжелым заболеваниям и смерти. В связи с этим необходимо постоянно следить за состоянием атмосферы Земли, уменьшать количество загрязняющих веществ, выбрасываемых в воздух. Количество и ассортимент веществ, загрязняющих внешнюю среду (выбросы производственной сферы и коммунальные отходы), настолько возросли, что природа не в состоянии обезвредить их естественным путем. Наибольшее загрязнение окружающей среды происходит в высокоразвитых в

промышленном отношении странах и странах, в которых сельское хозяйство широко использует удобрения, гербициды и другие химикаты. Высокая стоимость мероприятий по борьбе с загрязнением атмосферы приводит к выходу данной проблемы из рамок социальной и приобретению ей экономической значимости. В настоящее время на международном уровне рассматриваются проблемы, связанные с антропогенным воздействием на состав и свойства атмосферы нашей планеты [1, 2].

Согласно санитарным нормам, для снижения бактериальной обсемененности и пылевого насыщения воздуха до безопасного уровня в помещениях постоянного пребывания сотрудников существует ряд требований и мероприятий по контролю и очистке воздушных масс. В частности, согласно нормам СанПиН вентиляции офисных помещений, на одного человека необходимо подавать 60 м^3 в воздуха в час. Аналогично, СНИП вентиляции офисных помещений требует воздухообмена на одно рабочее место с компьютером не менее $60 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Обеспечение качества воздуха только с помощью приточно-вытяжной вентиляции в условиях городской застройки не всегда возможно, что связано с достаточно высокой загрязненностью атмосферы в промышленных центрах и крупных городах с высокой интенсивностью движения транспорта с двигателями внутреннего сгорания. В связи с этим нами рассмотрена возможность проектирования устройства для очистки и обеззараживания воздуха внутри помещений с временным пребыванием человека.

Авторами рассмотрена сравнительная эффективность устройств, основанных на различных методах очистки воздуха, и оценена целесообразность их использования в помещениях с учетом норм шумности установки и ее опасности для здоровья людей.

В процессе проектирования установки применен наиболее актуальный метод по очистке воздуха, а именно комбинированный – использование ультрафиолетового излучения совместно с предварительной очисткой воздуха через фильтры.

Ультрафиолетовое излучение (УФ, UV) – это электромагнитное излучение, длина волны которого больше, чем у рентгеновских лучей, но короче, чем у видимого света. Ультрафиолетовый свет подразделяется на различные длины волн, включая UV-C, который является коротковолновым ультрафиолетовым светом, его часто называют «бактерицидным» УФ.

Между длинами волн 200 и 300 нм, где работает UV-C, нуклеиновые кислоты в микроорганизме разрушаются. Нуклеиновые кислоты поглощают ультрафиолетовый свет, что приводит к образованию димеров пиримидина, которые нарушают способность нуклеиновых кислот реплицироваться или экспрессировать необходимые белки. Это приводит к гибели клеток бактерий и инактивации вирусов. Системы УФ-излучения могут быть установлены в закрытых помещениях, где постоянный поток воздуха обеспечивает высокий уровень воздействия. Эффективность зависит от многих факторов, включая качество и тип используемого оборудования, продолжительность воздействия, длину волны и интенсивность УФ-излучения, наличие защитных частиц и способность микроорганизма противостоять ультрафиолетовому излучению. Использование бактерицидной лампы для обеззараживания проточного нагнетаемого воздуха позволит значительно снизить активность микроорганизмов.

Во многом эффективность применения определяется скоростью воздушного потока. В установке будет использоваться вентилятор, обеспечивающий воздушный поток более $240 \text{ м}^3/\text{ч}$. Соответственно, с учетом кратности возду-

хообмена одна установка сможет обеззараживать воздух в помещении, где находится четыре человека, или в помещении площадью более 20 м².

Бактериально-пылевые воздушные фильтры – это устройства, используемые в аппаратах очистки воздуха, кондиционерах и некоторых увлажнителях воздуха для защиты оборудования и сотрудников от патогенных микроорганизмов и твердых пылевых частиц, ведущих к механическим повреждениям. По принципу работы они могут быть электростатическими или механическими: электростатические фильтры используют индуцированный электростатический заряд для захвата частиц, в то время как механические фильтры – плиссированную пористую мембрану. Механические фильтры могут достигать более высокой эффективности фильтрации, чем электростатические фильтры, но они налагают более высокое сопротивление воздушному потоку. В конструкции прибора нами решено использовать механические фильтры, предварительно очищающие воздух, до попадания его в камеру прибора, оснащенную УФ-бактерицидной лампой [1–8].

Основная часть

В процессе разработки было предложено реализовать возможность дистанционного управления прибором с последующей возможностью интеграции его в экосистему «умного дома». Для этого предусматривается в качестве управляющего устройства одноплатный компьютер Arduino Uno с комплексом датчиков. Контроллер Arduino Uno построен на ATmega328. Платформа имеет 14 цифровых входов/выходов (шесть из которых могут использоваться как выходы ШИМ), шесть аналоговых входов, кварцевый генератор 16 МГц, разъем USB, силовой разъем, разъем ICSP и кнопку перезагрузки. Для работы необходимо подать питание при помо-

щи адаптера AC/DC или батареи.

Основные блоки прибора: БП – блок питания; УРМ – устройство регулирования мощности; УУ – устройство управления; ДД – датчик движения; СВ – система вентиляции; БЛ – бактерицидная лампа; ДТ1, ДТ2 – датчик температуры и влажности; УЗ – устройство записи; УБП – устройство беспроводной передачи. Подключение происходит при напряжении в 15 В, которое впоследствии преобразуется до 5 В и поступает в цепь питания. Устройство управления принимает данные с датчиков температуры и с датчиков движения и выстраивает режим работы. Бактерицидная лампа и система вентиляции питаются от устройства управления. Считанная информация и режимы работы сохраняются на устройстве записи и могут быть считаны напрямую либо путем беспроводной связи через устройство беспроводной передачи.

Благодаря устройству управления можно оперативно считывать показания с датчиков и передавать их по беспроводной сети с помощью устройства беспроводной связи или сохранять на устройстве записи.

Структурная схема прибора представлена на рис. 1.

Устройство управления задаёт режимы работы системы вентиляции и бактерицидной лампы, что позволяет ей эффективно выполнять функции установки по очистке воздуха.

Внешний вид модели собранного устройства представлен на рис. 2.

Корпус прибора может быть выполнен из металла толщиной 0,3 мм либо из ламинированной плиты, что улучшает внешний вид прибора и легче вписывает его в офисное помещение. В надстройке расположен блок управления, включающий одноплатный компьютер и плату подключения датчиков. Предусматривается возможность перекатывания прибора с одного места на другое с последующей фиксацией колес.

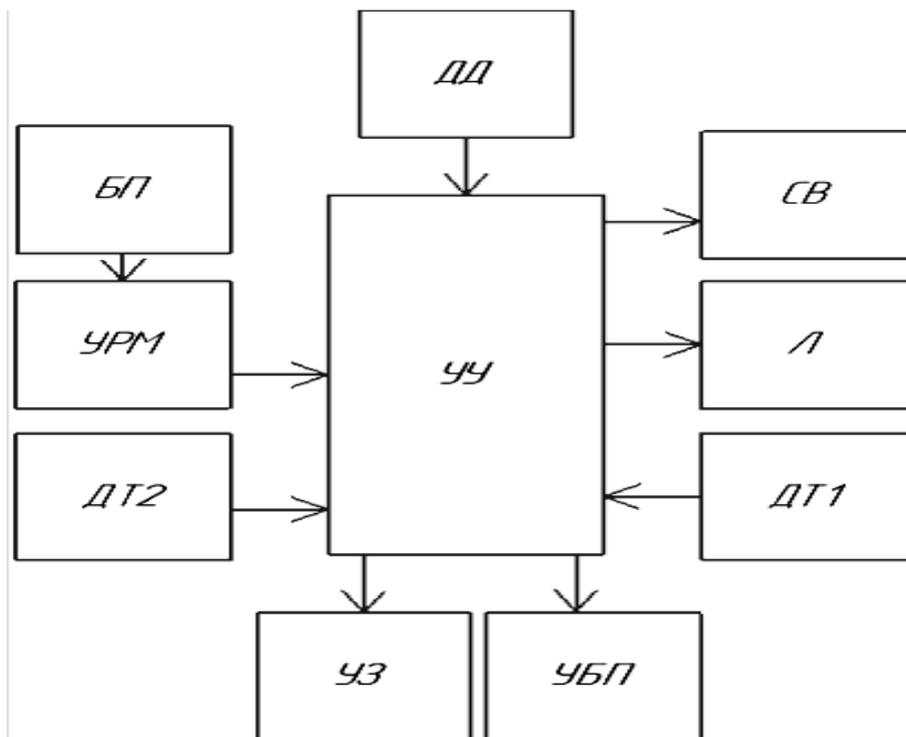


Рис. 1. Структурная схема устройства

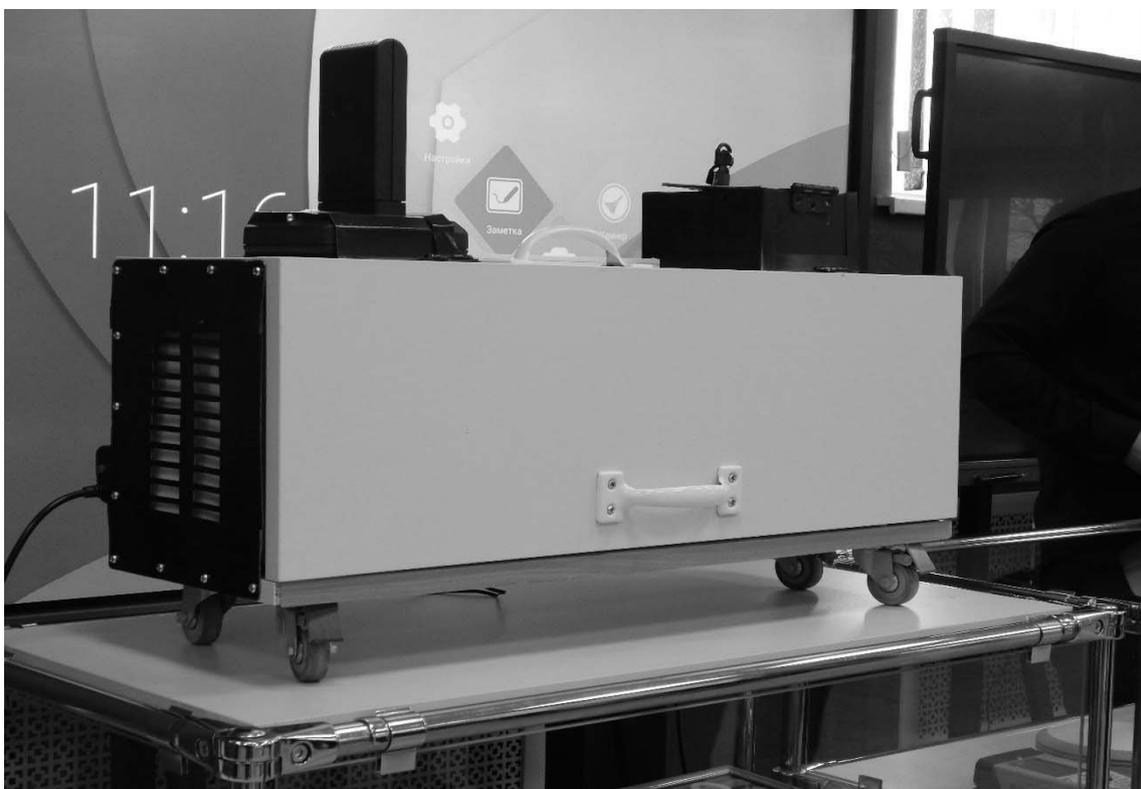


Рис. 2. Внешний вид устройства по очистке воздуха

Электрическое питание осуществляется от стационарной электросети напряжением 220 В и частотой 50 Гц. Предусматривается аварийное отключение прибора в случае пробоя на корпус или короткого замыкания. Автоматизированное устройство включает независимый размыкатель, позволяющий программными методами регулировать мощность и период работы устройства.

Для обеспечения электробезопасности перед началом работы прибор заземляется, при этом, т. к. в основном он стационарного использования, заземление может осуществляться путем подключения к шине заземления при ее наличии. Электрические контакты прибора заизолированы и скрыты внутри корпуса. Фильтр является съемным, что позволяет регулярно проводить уходные работы за ним. Вентилятор также может подвергаться профилактическим работам по мере необходимости, но не реже чем каждые 200 ч работы прибора в нормальных условиях. При работе в условиях повышенных температур частота профилактических работ будет возрастать. Прибор будет сигнализировать о необходимости очистки его и замене фильтра.

Авторами была проведена оценка

эффективности очистки воздуха от микроорганизмов и спор плесневых грибов. Общая микробная обсемененность воздушной среды помещения определялась по общему микробному числу методом Коха (седиментации) и подсчета колоний по правилу Омелянского. В качестве среды для определения общей микробной обсемененности воздушной среды помещения по общему микробному числу использовался мясо-пептонный агар, для определения количества гемолитических стрептококков применялся в качестве питательной среды кровяной агар, золотистые стафилококки культивировались на желточно-солевом агаре. Анализ проводился в цокольных помещениях первого корпуса университета, где практически отсутствует инсоляция, что способствует микробиологической активности. Эксперимент проводился в трех повторениях еженедельно в течение месяца. Усредненные по вариантам результаты исследований представлены в табл. 1 и 2. Норматив общего количества микроорганизмов – 1500 клеток/м³. Норматив нахождения в воздухе санитарно-показательных микроорганизмов (гемолитические стрептококки и золотистые стафилококки – далее ГМСКЗСК) составляет 16 клеток/м³.

Табл. 1. Численность микроорганизмов в воздухе учебных аудиторий

Вариант оценки	Общее количество микроорганизмов	В том числе гемолитические стрептококки и золотистые стафилококки
До применения устройства	1453 % ± 12 %	9 % ± 11 %
Применение устройства с фильтрами	872 % ± 17 %	5 % ± 20 %
Применение устройства с фильтром, бактерицидной лампой и ионизатором	357 % ± 9 %	–

Установлено, что до применения устройства микробиологическая обсемененность воздуха не превышала норму, но была близка к ней, что, скорее всего, связано с тем, что исследования проводились в полуподвальном

помещении. В то же время одни из наиболее опасных микроорганизмов – гемолитические стрептококки и золотистые стафилококки – по количеству не превышали норму. Однократное применение устройства с фильтром и

бактерицидной лампой позволило снизить содержание общего пула микроорганизмов в 4,07 раза. При этом гемолитические стрептококки и золотистые стафилококки полностью элиминировались из воздуха, что делало его более безопасным. В случае регулярного при-

менения данного устройства в течение часа содержание микроорганизмов постоянно находилось на допустимом уровне, не превышая допустимые нормы. При этом гемолитические стрептококки и золотистые стафилококки в воздухе помещения не фиксировались.

Табл. 2. Численность спор плесневых грибов в воздухе учебных аудиторий

Вариант оценки	Общее количество	В том числе Mucor sp.	В том числе Penicillium sp.	В том числе Aspergillus niger
До применения устройства	872 % ± 14 %	327 % ± 12 %	121 % ± 20 %	83 % ± 15 %
Применение устройства с фильтрами	651 % ± 10 %	213 % ± 10 %	95 % ± 20 %	41 % ± 20 %
Применение устройства с фильтром и бактерицидной лампой	347 % ± 10 %	171 % ± 10 %	93 % ± 20 %	37 % ± 20 %

Изучив наличие спор плесневых грибов в воздухе вышеуказанного помещения, можно отметить, что их количество было достаточно высоким, но не опасным для здорового человека. В то же время для лиц, страдающих аллергическими заболеваниями, фон был достаточно интенсивным.

Авторами установлено, что разовое применение прибора позволяет уменьшить пул спор плесневых грибов в 2,51 раза, при этом количество наиболее опасной формы черной плесени (*Aspergillus niger*) снижается в 2,24 раза. При регулярном использовании прибора количество спор плесневых грибов снижается на порядок по сравнению с исходным, что делает воздух практически безопасным в том числе для людей, страдающих заболеваниями органов дыхания и иммунодефицитами.

Заключение

Авторами предложено устройство по очистке воздуха, основанное на деталях, производимых в России,

Беларуси и дружественных странах, способное заместить импортные аналоги. Такое устройство позволит обеспечивать безопасные условия в помещениях, в том числе не оборудованных приточно-вытяжной принудительной вентиляцией. Оно способно работать в автономном режиме, дистанционно включаться и отключаться, а также отключаться в присутствии людей в помещении.

Малое энергопотребление делает его использование в домашних условиях целесообразным с экономической точки зрения.

На основе микробиологической оценки эффективности применения устройства установлено, что при регулярном применении и правильном обслуживании прибора он значительно снижает обсемененность воздуха микроорганизмами и спорами плесневых грибов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инженерная экология: учебное пособие / А. В. Щур [и др.]. – Рязань: ИП Коняхин А. В., 2021. – 180 с.
2. Независимая экологическая экспертиза «Экология жизненного пространства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ecospace.ru/ecology/science/cleaner>. – Дата доступа: 03.03.2023.
3. Экология: учебник / А. В. Щур [и др.]. – Рязань: ИП Викулов К. В., 2021. – 248 с.
4. Щур, А. В. Подходы к очистке воздуха офисных и жилых помещений / А. В. Щур, А. А. Александронец // Безопасный и комфортный город : материалы V Междунар. науч.-практ. конф., Орел, 6–8 июня 2022 г. – Орел: Орлов. гос. ун-т им. И. С. Тургенева, 2022. – С. 383–385.
5. Александронец, А. А. Устройство для дезинфекции и очищения воздуха в помещении / А. А. Александронец, Р. В. Терещенко, А. В. Щур // 58 студенч. науч.-техн. конф. Белорус.-Рос. ун-та. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – С. 17.
6. Оценка качества воздуха помещений на полигонах твердых коммунальных отходов по микробному загрязнению и способ его очистки / К. В. Воробьев [и др.] // Поволж. эколог. журн. – 2023. – № 1. – С. 20–36.
7. Assessment of the resistance of alimentary-related risk factors to the effects of chemical disinfectants / Yu. O. Lyashchuk [et al.] // Agrarian Bulletin of the Urals. – 2022. – № 12 (227). – P. 54–61.
8. Основы общей и прикладной экологии / М. В. Романов [и др.]. – Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2022. – 171 с.

Статья сдана в редакцию 13 июля 2023 года

Контакты:

shchur@yandex.by (Щур Александр Васильевич);
putinagutin88@gmail.com (Александронец Алексей Александрович);
mega.rom19@mail.ru (Романов Михаил Васильевич);
chusov17@mail.ru (Чусов Александр Николаевич).

A. V. SHCHUR, A. A. ALEXANDRONETS, M. V. ROMANOV, A. N. CHUSOV

AIR PURIFICATION DEVICE FOR RESIDENTIAL AND OFFICE PREMISES

Abstract

The design of the device for air purification is proposed, and its effectiveness in purifying indoor air from microorganisms is substantiated.

Keywords:

air purification device, design, ultraviolet disinfection, microorganisms.

For citation:

Air purification device for residential and office premises / A. V. Shchur, A. A. Alexandronets, M. V. Romanov, A. N. Chusov // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 3 (80). – P. 161–167.

ЭКОНОМИКА. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

DOI: 10.53078/20778481_2023_3_168

УДК 338.001.36

С. Л. КОМАРОВА

В. Д. МИЛЬКО

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ОЦЕНКА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ОРГАНИЗАЦИИ МЕТОДОМ БЕНЧМАРКИНГА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗРАБОТАННОГО ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА

Аннотация

Исследуется применение инновационного метода для оценки конкурентоспособности строительных компаний, которые являются частью одного предприятия, холдинга или филиала, а именно бенчмаркинга. Анализируются как положительные, так и отрицательные аспекты, связанные с оценкой конкурентоспособности. Предложена схема, которая позволяет преобразовывать негативные характеристики в удобную для восприятия форму. Метод позволяет визуализировать оценку конкурентоспособности, а программный продукт делает эту методику максимально адаптированной для работы любой организации данного профиля.

Ключевые слова:

бенчмаркинг, инновационный подход, оценка конкурентоспособности, критерии для оценки.

Для цитирования:

Комарова, С. Л. Оценка конкурентоспособности подразделений организации методом бенчмаркинга с использованием разработанного программного продукта / С. Л. Комарова, В. Д. Милько // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 3 (80). – С. 168–177.

Конкурентная среда оказывает серьезное влияние на эффективность работы предприятия. Своё состояние в рыночном пространстве предприятие обязано мониторить для удержания занятых позиций и с целью захвата большей рыночной ниши. Это достаточно трудоемко с точки зрения любой организации, а если предприятие представляет собой холдинг, состоящий из головного предприятия и множества филиалов, то процедура мониторинга становится еще более трудоемкой.

Работу нескольких филиалов и подчиненных предприятий необходимо отслеживать по многим критериям,

иначе управленческие решения могут нанести непоправимый вред деятельности организации.

С такими трудностями сталкиваются многие фирмы, относящиеся к транспортной сфере, и для решения проблемы мониторинга их деятельности и принятия своевременных управленческих решений было решено оценить конкурентоспособность всех подразделений организации и предложить несколько методик по этой оценке.

Объектом исследования выбран АО «Газстройпром», головная компания многопрофильного холдинга. Производственные компании группы «Газ-

стройпром» работают во всех федеральных округах Российской Федерации.

Воспользуемся самым простым с точки зрения восприятия и визуализации методом оценки конкурентоспособности – бенчмаркинг.

Бенчмаркинг позволяет оценить объект по выбранным характеристикам путем построения площадной диаграммы.

Из перечня предложенных параметров конкурирующих объектов выбираются наиболее важные с точки зрения руководящей организации (холдинга). Затем для каждого параметра предлагается на луче, выходящем из начала координат, отложить значение, соответствующее данному предприятию, причем чем дальше оно от начала координат, тем лучше значение показателя, который принят к рассмотрению. Затем необходимо соединить все точки, которые соответствуют этому предприятию в одну площадную диаграмму (розу).

Та организация, у которой площадная диаграмма окажется больше по площади, является более конкурентоспособной по сравнению с другими,

т. к. ее характеристики лучше. Площадь максимальной фигуры наглядно докажет её конкурентные превосходства по сравнению с другими.

Выбраны восемь показателей, по которым было решено проводить оценку конкурентоспособности. Это такие показатели, как коэффициент технической готовности техники, коэффициент использования парка, коэффициент технического использования, коэффициент сменности, доля машин в длительном ремонте (Д1), доля машин в простое без водителя (Д2), доля машин в простое технологическом (Д3), доля машин в длительной перебазировке (Д4). Эти показатели было решено разделить на две группы: позитивные и негативные.

Важно отметить, что негативные критерии необходимо преобразовать для более корректного составления роз и получения оценки. Для этого использовалась формула $a = 1 - k$, где a – показатель после преобразования; k – значение показателя. Составлены таблицы с данными, которые и применялись в дальнейшей оценке. Результат составления таблиц представлен в табл. 1 и 2.

Табл. 1. Таблица позитивных критериев

Показатель	ПК-1	ПК-2	ПК-3	ПК-4	ПК-5	ПК-6	ПК-7	ПК-8	ПК-9	ПК-10
K_{mc}	0,809	0,680	0,689	0,852	0,758	0,615	0,417	0,849	0,617	0,95
$K_{ин}$	0,798	0,663	0,44	0,741	0,746	0,585	0,208	0,682	0,517	0,95
$K_{ми}$	0,988	0,974	0,639	0,869	0,983	0,950	0,499	0,804	0,838	1
$K_{смен.}$	0,966	0,985	0,972	0,988	0,933	0,988	0,945	0,999	0,965	1

Табл. 2. Таблица негативных критериев

Показатель	ПК-1	ПК-2	ПК-3	ПК-4	ПК-5	ПК-6	ПК-7	ПК-8	ПК-9	ПК-10
Д1	0,98	0,936	0,978	1	1	0,985	0,708	0,924	0,85	0,95
Д2	0,95	0,930	0,844	1	0,982	0,862	0,792	0,909	1	1
Д3	0,92	0,948	0,644	0,741	0,764	0,739	0,708	0,849	0,567	1
Д4	0,99	1	0,996	0,989	1	1	0,997	0,985	0,99	1

Для оценки необходимо составить графики в виде розы. Розы составляются по компаниям, входящим в один холдинг. Каждая ось розы соответствует одному из критериев. По каждому пред-

приятию на осях отмечаются соответствующие таблица значения. После они соединяются, образуя розы. Результат получения при составлении роз можно увидеть на диаграммах (рис. 1 и 2).

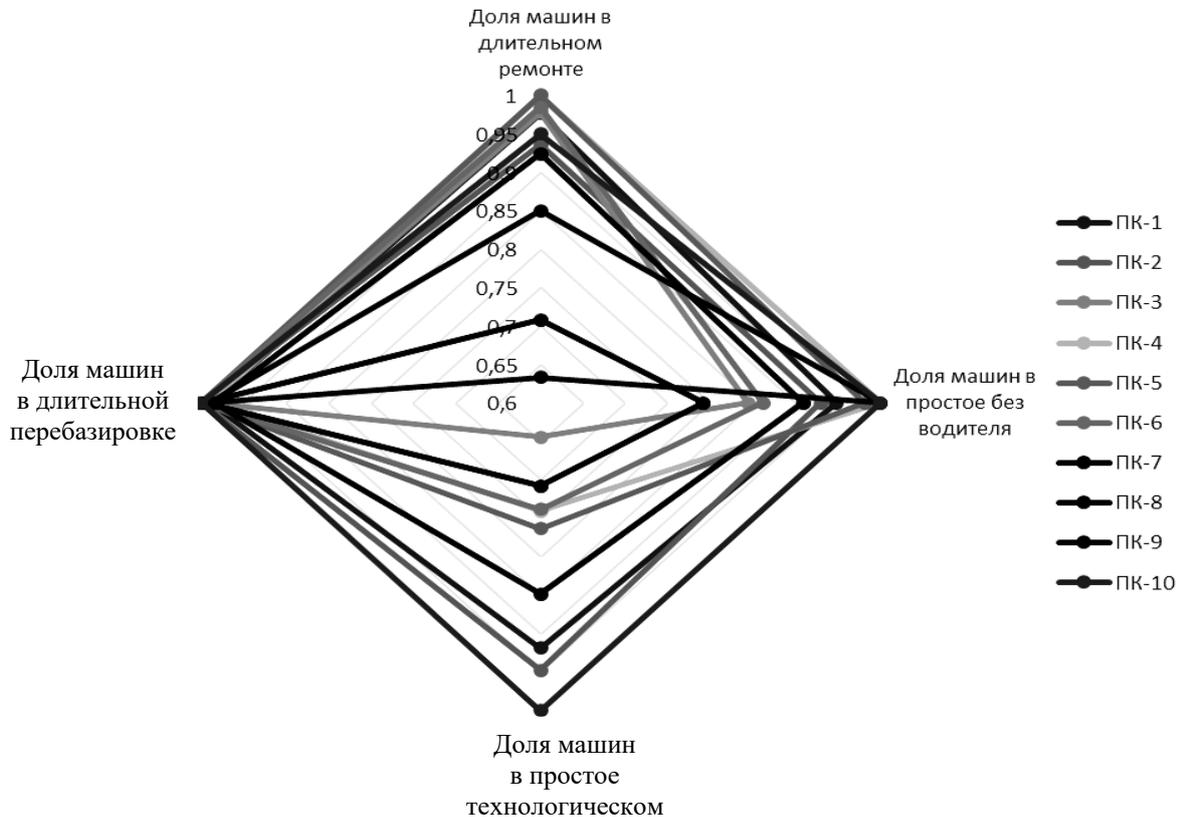


Рис. 1. Диаграмма негативных критериев

На следующем этапе оценки необходимо посчитать площади полученных роз и составить таблицу полученных площадей. Для подсчёта площадей использовалась формула $S = \frac{1}{2}ab\sin\alpha$, где a, b – показатели двух соседних осей; α – угол между осями. В полученных розах угол $\alpha = 90^\circ$, а значит, в нашем случае $\sin\alpha = \frac{1}{2}$. Данная формула находит площадь только одной части розы. Для получения площади всей розы необходимо сложить все площади всех частей розы. По полученной формуле были найдены и занесены в табл. 3 площади

всех составленных роз.

Для наглядности таблицы были преобразованы в столбчатые диаграммы. Результат преобразования можно увидеть на рис. 3 и 4.

Согласно методу бенчмаркинга самой конкурентоспособной компанией будет та компания, площадь розы которой будет больше. Из столбчатых диаграмм наглядно видно, что в группе позитивных показателей лидирующие позиции занимают ПК-10 (1,9013), ПК-1 (1,5826), ПК-4 (1,4874). В группе негативных показателей лидирующие позиции занимают ПК-10 (1,95), ПК-1 (1,8372), ПК-2 (1,8181).

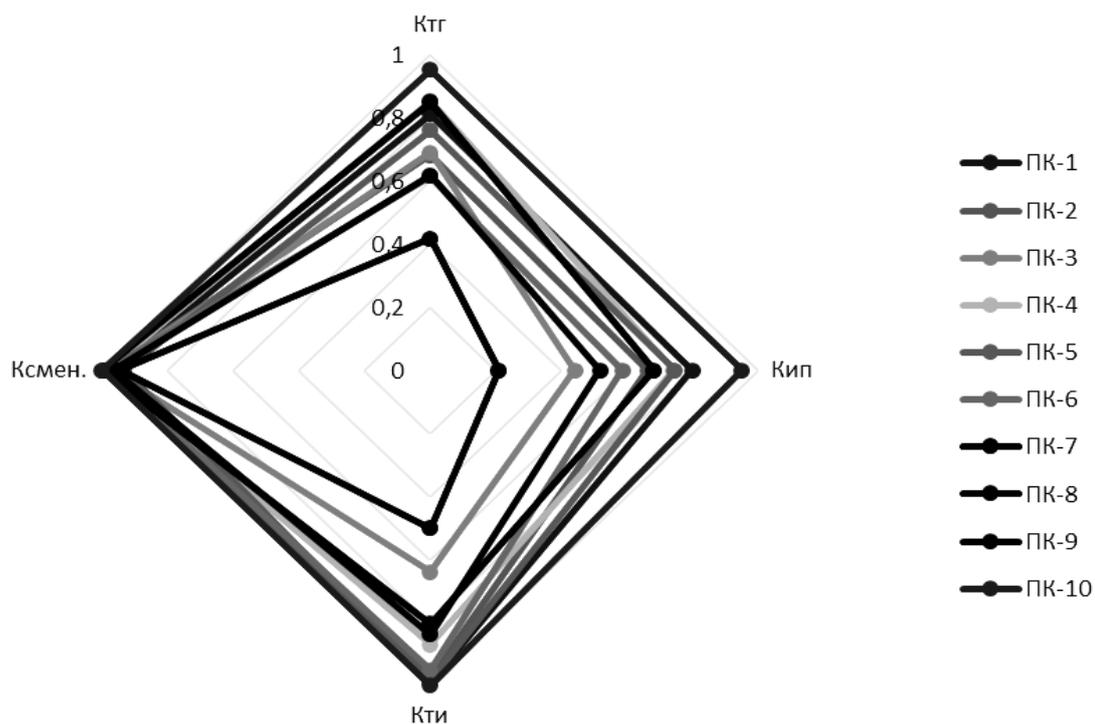


Рис. 2. Диаграмма позитивных критериев

Табл. 3. Таблица площадей полученных фигур

Параметр	ПК-1	ПК-2	ПК-3	ПК-4	ПК-5	ПК-6	ПК-7	ПК-8	ПК-9	ПК-10
Площадь фигур негативных показателей	1,84	1,818	1,493	1,731	1,748	1,604	1,267	1,679	1,409	1,950
Площадь фигур позитивных показателей	1,58	1,364	0,938	1,487	1,461	1,230	0,529	1,388	1,078	1,901

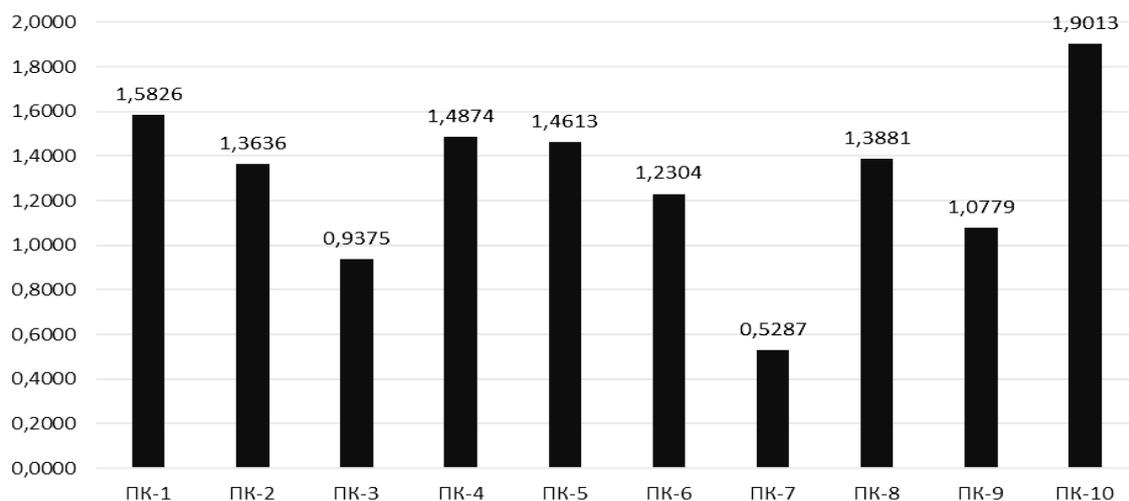


Рис. 3. Диаграмма площадей фигур позитивных критериев

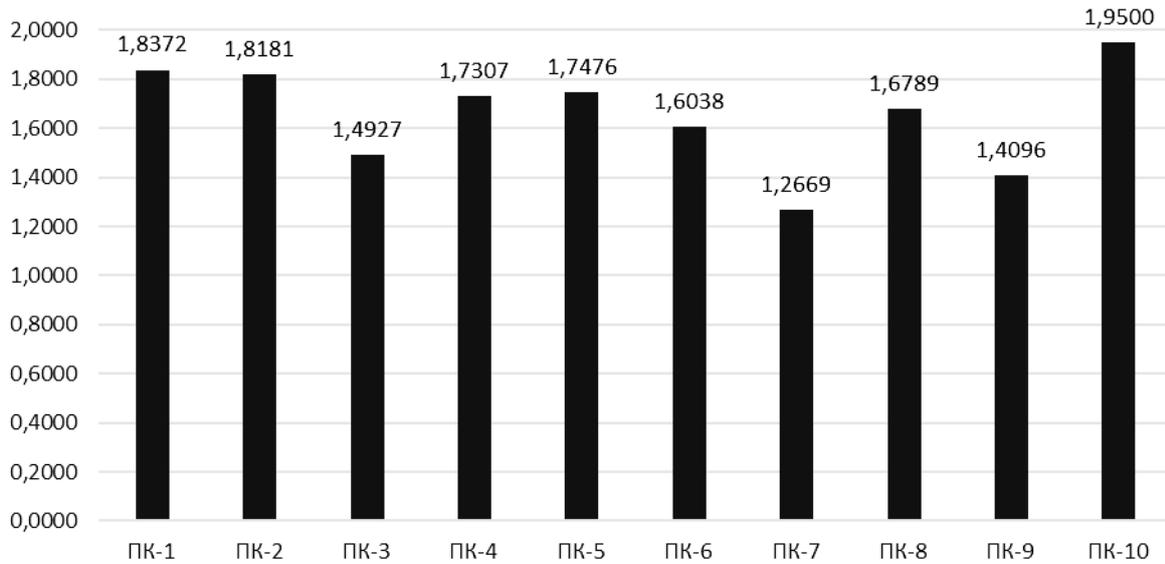


Рис. 4. Диаграмма площадей фигур негативных критериев

Следует отметить, что прослеживается зависимость в распределении мест по позитивным и негативным критериям. Самой конкурентоспособной компанией по двум группам критериев стала ПК-10, показавшая почти максимальные показатели.

Данный анализ на предприятии необходимо проводить достаточно часто, желательно не реже двух раз в неделю. В связи с этим возникает следующая проблема: количество компаний в холдинге может расти или быть достаточно большим. Количество критериев для оценки необходимо взять максимально возможное для более точных результатов оценки. Сотрудники просто физически не способны проводить данный анализ так часто, а с увеличением количества показателей возникают проблемы с ручным подсчётом

площадей. Для решения этой задачи был разработан программный продукт, который автоматически позволяет получить оценку конкурентоспособности методом бенчмаркинга по предоставленным данным.

Программный продукт разработан согласно ранее описанному методу. Для разработки использовались такие языки программирования, как PHP 8.1, Blade (Laravel 10), CSS 3.0 и библиотеки bootstrap 5.1, jquery 3.6.4, ChartJs 3. В качестве фреймворка использовался Laravel 10.

Страница оценки конкурентоспособности методом бенчмаркинга содержит два поля: «Количество строк» и «Количество столбцов» (рис. 5). Данные поля нужны для того, чтобы задать таблицу для внесения данных необходимого размера.

Кол. строк	Введите количество строк	Кол. столбцов	Введите количество столбцов	Применить
------------	--------------------------	---------------	-----------------------------	-----------

Рис. 5. Поля для задачи размерности таблицы с данными

При нажатии кнопки «Применить» таблица (рис. 6) принимает заданные пользователем размеры. В приведённой таблице столбцы отражают компании,

а строки параметры или критерии, по которым будет проводиться оценка конкурентоспособности. Результат работы программы продемонстрирован на рис. 6.

Кол. строк	3	Кол. столбцов	3	Применить
#	ПК 1	ПК 2	ПК 3	
Параметр 1	<input type="text" value="Значение"/>	<input type="text" value="Значение"/>	<input type="text" value="Значение"/>	
Параметр 2	<input type="text" value="Значение"/>	<input type="text" value="Значение"/>	<input type="text" value="Значение"/>	
Параметр 3	<input type="text" value="Значение"/>	<input type="text" value="Значение"/>	<input type="text" value="Значение"/>	
<input type="button" value="Посчитать"/>				

Рис. 6. Таблица, полученная по заданным параметрам

В каждое поле таблицы необходимо внести соответствующее значение и после нажать кнопку «Посчитать». Система начнёт вычисления и на странице появятся четыре раздела: «Построенные розы», «Столбчатая диаграмма площадей», «Таблица полученных площадей», «Результат анализа». Каждый из этих разделов по нажатию «разворачивается», и пользователь видит необходимую информацию. Результат работы программы после нажатия на кнопку «Посчитать» представлен на рис. 7.

Раздел «Построение розы» содержит график в виде радарной диаграммы, в котором каждая ось – это критерий, а все розы отличаются цветом для наглядности. Для удобства пользователя существует возможность убирать из графика некоторые розы, реализация

представлена на рис. 8. Также при наведении курсора на точку графика отображается показатель в данной точке и указывается производственная компания или компании, если значений несколько. Результат работы представлен на рис. 9.

Раздел «Столбчатая диаграмма площадей» содержит столбчатую диаграмму площадей всех роз в разрезе компаний. Данная диаграмма позволяет пользователю быстро визуально оценить результаты вычислений и уже на этом этапе оценить конкурентоспособность компаний. При наведении на столбцы отображаются числовые показатели площади полученных роз. Полученные в приложении столбчатые диаграммы площадей представлены на рис. 10.

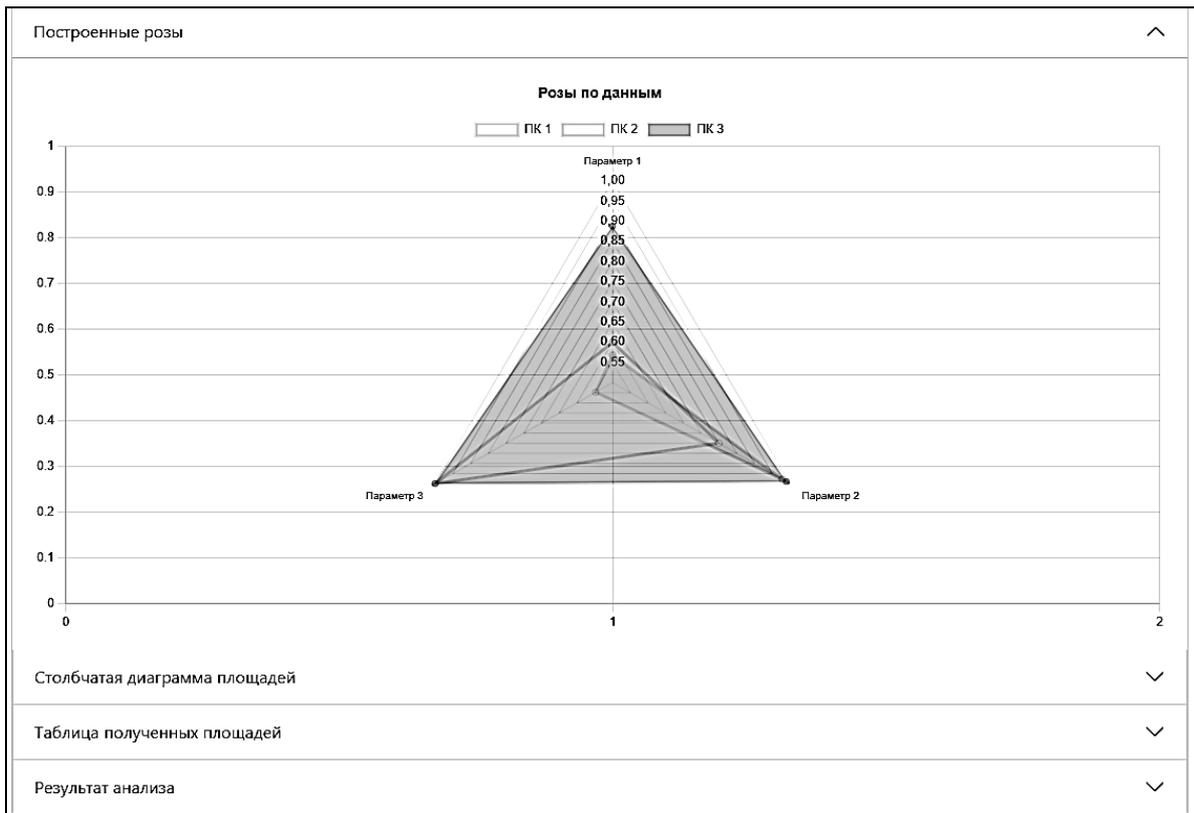


Рис. 7. Результат работы программы после нажатия кнопки «Посчитать»

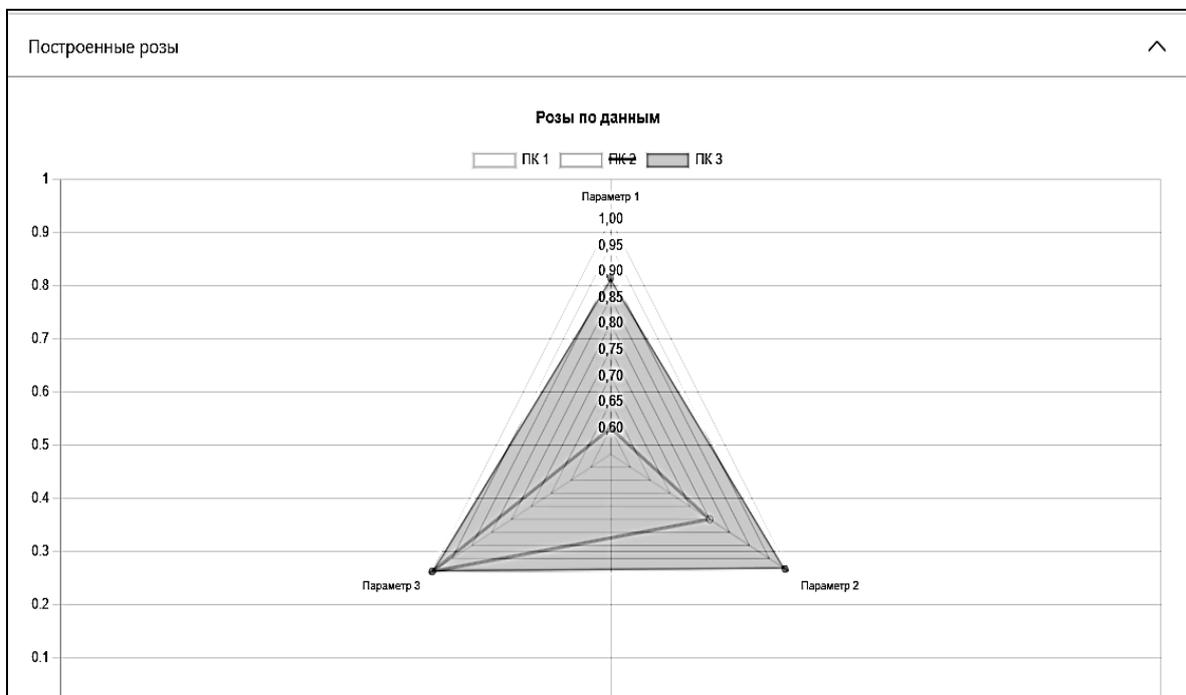


Рис. 8. График с исключенной из него компанией «ПК-2»

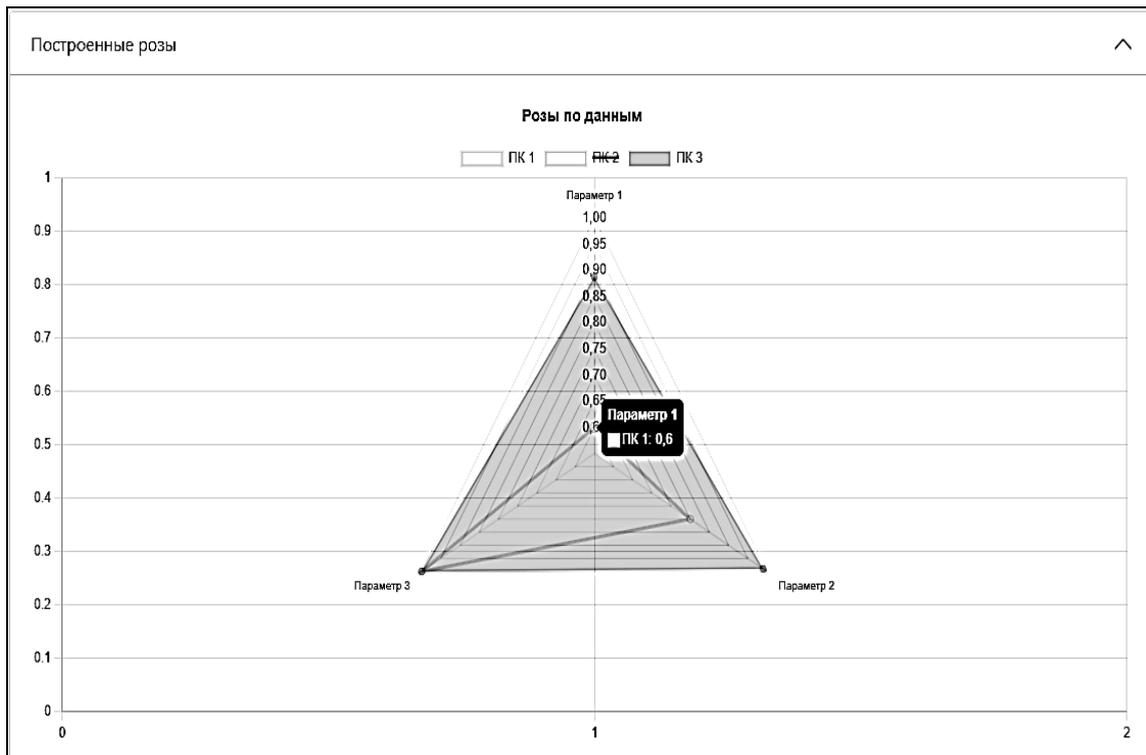


Рис. 9. Результат наведения курсора на точку графика

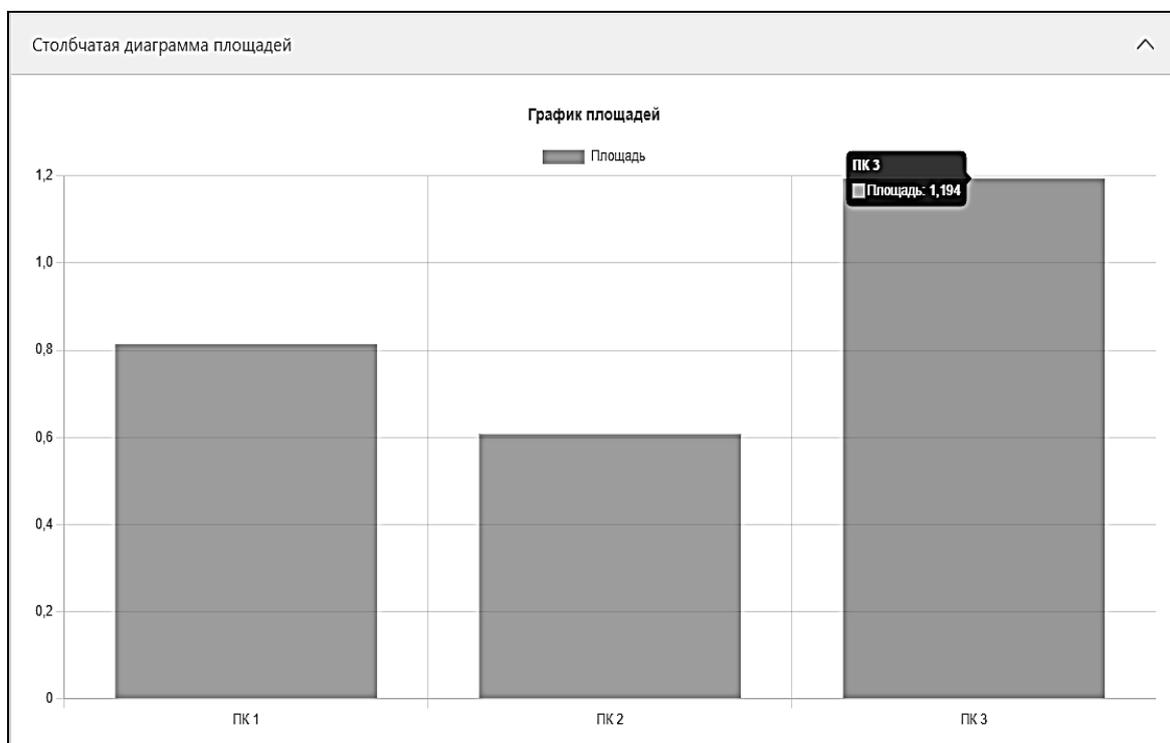


Рис. 10. Столбчатая диаграмма площадей полученных роз

Раздел «Таблица полученных площадей» содержит таблицу площадей полученных роз, где каждый столбец отображает компанию. В каждой ячейке таблицы содержится числовое значение, соответствующее площади розы. Результат вывода на экран таблицы площадей полученных роз представлен на рис. 11.

Таблица полученных площадей			
#	ПК 1	ПК 2	ПК 3
Площадь	0.8141	0.6076	1.1939

Рис. 11. Таблица площадей полученных роз в разрезе компаний

Результат анализа
Наилучшей компанией является ПК 3, с показателем площади розы равным 1.1939. Худшей является ПК 2, с показателем площади розы равным 0.6076.

Рис. 12. Результат анализа

Авторами разработано приложение, которое позволяет производить оценку конкурентоспособности компаний автоматически. Приложение прошло тестирование и может использоваться в промышленном масштабе, а также в учебных целях. Важно отметить, что аналогов подобного приложения, которое производило бы оценку конкурентоспособности компаний методом бенчмаркинга и визуально выдавало результаты, в мире не существует. Данные в приложение могут вноситься автоматически при помощи базы данных предприятия. Предложенный вариант с внесением данных вручную реализован для наглядности работы приложения и возможности использования приложения в учебных целях. Данная раз-

В разделе «Результат анализа» представлена краткая текстовая информация с данными о самой конкурентоспособной и самой неконкурентоспособной компаниях, что помогает пользователю быстро получить результат оценки. Результат вывода раздела «Результат анализа» представлен на рис. 12.

работка адаптирована для всех видов устройств, в том числе и для смартфонов, а также доступ возможен посредством сети Интернет. Приложение спроектировано согласно принципам объектно-ориентированного программирования (ООП), легко масштабируется и может быть использовано как модуль уже существующих систем на предприятиях. В дальнейшем будет добавлена возможность составления отчетов по результатам анализа в форматах xls, pdf, docx и других по запросу предприятий. Планируется продолжить исследования в области оценки конкурентоспособности и разработать приложения и для других методов оценки конкурентоспособности, что позволит упростить работу аналитических цен-

тров больших компаний.

Непрерывный мониторинг конкурентоспособности компаний на протяжении определенного периода (неделя, месяц, год) дает возможность вносить корректировки в стратегию развития производственных компаний для их ро-

ста. Важно отметить, что оценка конкурентоспособности производственных компаний, принадлежащих холдингу, позволяет выявить преимущества и недостатки каждой компании отдельно и провести мониторинг, внося изменения в их хозяйственную деятельность.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кожухар, В. М.** Инновационный менеджмент: учебное пособие / В. М. Кожухар. – Москва: Дашков и К, 2010. – 292 с.
2. ГАЗСТРОЙПРОМ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gsprom.ru/>. – Дата доступа: 14.10.2022.

Статья сдана в редакцию 16 мая 2023 года

Контакты:

leo-akulovich@yandex.ru (Комарова Светлана Леонидовна);

milko.vadimka@mail.ru (Милько Вадим Дмитриевич).

S. L. KOMAROVA, V. D. MILKO

ASSESSMENT OF COMPETITIVENESS OF ORGANIZATION SUBDIVISIONS THROUGH THE BENCHMARKING METHOD USING THE SOFTWARE PRODUCT DEVELOPED

Abstract

This article explores the application of benchmarking, as an innovative method for assessing the competitiveness of construction companies that are part of the same enterprise, holding or branch. Both positive and negative aspects related to the assessment of competitiveness are analyzed. Moreover, a scheme is proposed that makes it possible to transform negative characteristics into an easy-to-understand form. The method allows visualizing the assessment of competitiveness, and the software product makes this methodology as adaptable as possible for the work of any organization of a given profile.

Keywords:

benchmarking, innovative approach, competitiveness assessment, evaluation criteria.

For citation:

Komarova, S. L. Assessment of competitiveness of organization subdivisions through the benchmarking method using the software product developed / S. L. Komarova, V. D. Milko // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 3 (80). – P. 168–177.

ВЕСТНИК БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 3(80) 2023

Ответственный за выпуск

И. В. Брискина

Оформление обложки

В. П. Бабичева

Дизайн и компьютерная верстка

Н. П. Полевничая

Адрес редакции: пр-т Мира, 43, Белорусско-Российский университет, корп. 1, комн. 332, 212022, г. Могилев. Телефон: 71-30-54, e-mail: bru@bru.by.

Журнал «Вестник Белорусско-Российского университета» зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь. Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1240 от 15.06.2022.

Подписано в печать . Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 20,93. Уч.-изд. л. 11,13. Тираж 100 экз. Заказ

Отпечатано в унитарном полиграфическом коммунальном предприятии «Могилевская областная укрупненная типография имени Спиридона Соболя». ЛП 02330/23 от 30.12.2013. Ул. Первомайская, 70, 212030, г. Могилев.