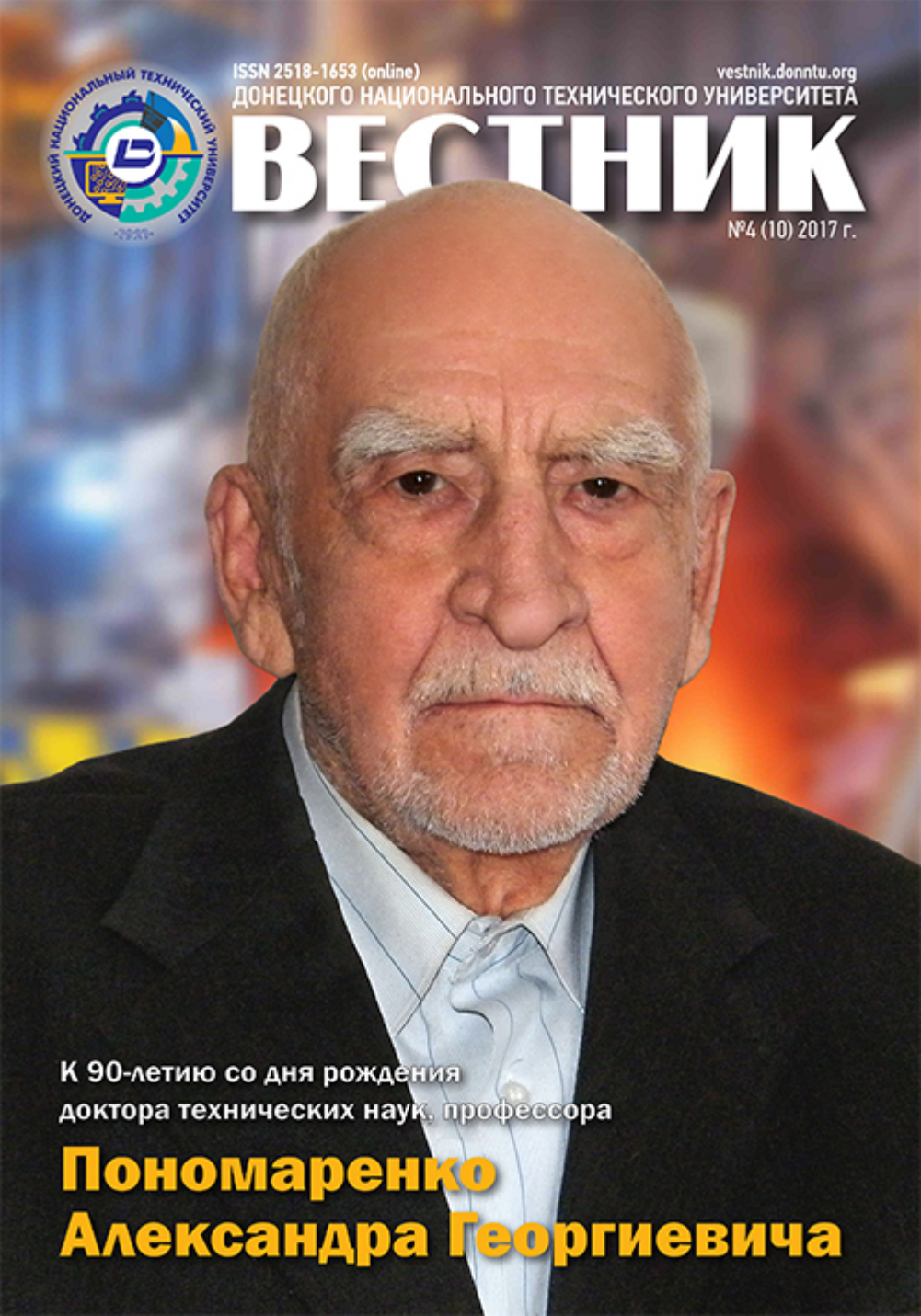
ISSN 2518-1653 (online)
vestnik.donntu.org

ДОНЕЦКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

ВЕСТНИК

№4 (10) 2017 г.



К 90-летию со дня рождения
доктора технических наук, профессора

Пономаренко Александра Георгиевича

ВЕСТНИК ДОННТУ №4(10)'2017

международный научно-технический журнал

Учредитель и издатель: *ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)*

Главный редактор
Маренич К.Н. (д.т.н., проф.)*

Зам. главного редактора
Булгаков Ю.Ф. (д.т.н., проф.)*

Ответственный секретарь
Сотников А.Л. (д.т.н., доц.)*

Редакционный совет:
Артюх В. Г. (д.т.н., проф.)
Беломеря Н.И. (к.т.н., доц.)*
Бершадский И.А. (д.т.н., проф.)*
Бирюков А.Б. (д.т.н., проф.)*
Бутузова Л.Ф. (д.х.н., проф.)*
Высоцкий Ю.Б. (д.х.н., проф.)*
Горбатко С.В. (к.т.н., доц.)*
Горбатюк С. М. (д.т.н., проф.)*
Дедовец И.Г. (к.т.н., доц.)*
Еронько С.П. (д.т.н., проф.)*
Захаров Н.И. (д.т.н., доц.)*
Ковалев А.П. (д.т.н., проф.)*
Кожевникова И.А. (д.т.н., доц.)
Кондрахин В.П. (д.т.н., проф.)*
Кононенко А.П. (д.т.н., проф.)*
Куренный Э.Г. (д.т.н., проф.)*
Приседский В.В. (д.х.н., проф.)*
Ченцов Н.А. (д.т.н., доц.)*
Шабаев О.Е. (д.т.н., проф.)*
Шаповалов В.В. (д.х.н., проф.)*
Яковченко А.В. (д.т.н., проф.)*
** - штатные сотрудники учредителя*

Адрес: 28300, г. Донецк, ул. Артема, 58
Телефон +380 (62) 304-60-82
Эл. почта: vestnikdonntu@gmail.com
Интернет: vestnik.donntu.org

Вестник ДонНТУ
2017. №4(10)

ISSN 2518-1653 (online)

Издается с января 2016 г.
Периодичность издания: 4 раза в год

Свидетельство о государственной регистрации № 000133 от 27.05.2017

За содержание статей и их оригинальность несут ответственность авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов. За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

Подписано к печати по решению Ученого Совета ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»
Протокол №11 от 22.12.2017

Формат 60×84$^{1/8}$. Заказ 1217.
Изд-во «Донецкая политехника», 2017

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

С.П. Еронько, М.Ю. Ткачёв, Б.И. Стародубцев
Моделирование работы модернизированной системы газоотсоса кислородного конвертера с вращающимся корпусом 3

С.А. Снитко, А.В. Яковченко, А.Л. Сотников
Совершенствование технологии и оборудования в колесопрокатном производстве 13

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

Н.Г. Афендиков, А.В. Шендрик
Повышение надежности гидроприводов проходческих комбайнов за счет электромеханической обработки внутренних поверхностей гидроцилиндров 22

О.Е. Шабаев, В.Г. Нечепаев, П.П. Зинченко, А.В. Мезников, А.В. Коваленко
Методика определения удельных энергозатрат разрушения и погрузки очистных комбайнов для тонких пластов в реальных условиях эксплуатации 28

В.Н. Скляров
Экспериментальные исследования роликов шахтных ленточных конвейеров повышенной долговечности 34

О.Е. Шабаев, И.И. Бридун
Диагностирование поломок резцов осевой коронки проходческого комбайна типа П110-04 39

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

И.А. Удодов, Н.А. Спиридонов, В.М. Погибко, В.В. Приседский
Синтез мультиферроиков $PbFe_{0,5}Nb_{0,5}O_3$–$BiFeO_3$ в средах с контролируемым давлением пара оксида свинца 44

ЮБИЛЕИ И ПЕРСОНАЛИИ

К 90-летию А.Г. Пономаренко. 51

ИНФОРМАЦИЯ

Требования к статьям, направляемым в редакцию 52

Информация об издании

– На страницах журнала публикуются научные статьи фундаментального и прикладного характера, информация о конференциях, семинарах и выставках; освещается деятельность ведущих научно-исследовательских и проектных институтов, промышленных предприятий и коммерческих организаций, технопарков.
– Журнал оказывает информационную поддержку в продвижении на рынок конкурентоспособной наукоемкой продукции, проектов, научно-технических разработок и высоких технологий в различных областях промышленности.
– Журнал распространяется бесплатно в печатном и эл. виде посредством сети Интернет; принимает участие в научных конференциях и выставках.
– Журнал включен в «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ). Интернет: elibrary.ru
– Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий Высшей аттестационной комиссии (ВАК) ДНР. Интернет: vak.mondnr.ru
– Редакция журнала принимает к публикации и осуществляет рецензирование рукописей статей по химическим и техническим наукам и следующим группам специальностей: 05.02 – Машиностроение и машиноведение; 05.05 – Транспортное, горное и строительное машиностроение; 05.09 – Электротехника; 05.16 – Металлургия и материаловедение; 05.17 – Химическая технология.

VESTNIK DONNTU №4(10)'2017

international scientific-technical journal

Founder and publisher Donetsk National Technical University (Donetsk)

Editor-in-chief
Marenych K.N. (Dr. Sci. (Eng.), Prof.)*

Deputy Editor-in-chief
Bulgakov Y.F. (Dr. Sci. (Eng.), Prof.)*

Executive secretary
Sotnikov A.L. (Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof.)*

Editorial council:
Artyukh V. G. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)
Belomerya N. I. (Cand. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Bershadsky I. A. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Biryukov A.B. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Butuzova L.F. (Dr. Sci. (Chem.), Prof.)*
Vysotsky Y.B. (Dr. Sci. (Chem.), Prof.)*
Gorbatko S. V. (Cand. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Gorbatyuk S. M. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)
Dedovets I.G. (Cand. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Eron'ko S.P. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Zaharov N. I. (Dr. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Kovalev A.P. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Kozhevnikova I. A. (Dr. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)
Kondrahin V.P. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Kononenko A.P. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Kurennyiy E. G. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Prisedsky V.V. (Dr. Sci. /Chem./, Prof.)*
Chentsov N. A. (Dr. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Shabayev O.E. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Shapovalov V.V. (Dr. Sci. /Chem./, Prof.)*
Yakovchenko A.V. (Dr. Sci. /Chem./, Prof.)*
** - staff members of the founder*

Address: 283001, Donetsk, 58, Artema St.
Phone +380 (62) 304-60-82,
E-mail: vestnikdonntu@gmail.com
Internet: vestnik.donntu.org

Vestnik DonNTU
2017. No. 4(10)

ISSN 2518-1653 (online)

Published since January, 2016
Publication frequency: 4 times a year

Certificate of State Registration
No. 000133 dated 27.05.2017

The content and originality of the articles is the author's responsibility. The editorial opinion may not necessarily represent the views of the authors. The content of advertising material is the advertiser's responsibility.

Subscribed to print
on the recommendation
of the Academic Council
Donetsk National Technical University
Protocol No.11 dated 22.12.2017

Format 60×84$^{1/8}$. Order 1217.
Publishing house
"Donetsk Polytechnic", 2017

CONTENTS

ENGINEERING AND ENGINEERING SCIENCE

S.P. Eron'ko, M.Yu. Tkachev, B.I. Starodubtsev
The simulation of the upgraded system of the oxygen vessel gas suction with a rotating frame..... 3

S.A. Snitko, A.V.Yakovchenko, A.L. Sotnikov
Improvement of technology and equipment in wheel-rolling mills..... 13

TRANSPORT, MINING AND CONSTRUCTION ENGINEERING

N.G. Afendikov, A.V. Shendrik
Improving the reliability of a cutter-loader hydraulic drive due to electromechanical machining of internal surfaces of hydraulic cylinders..... 22

O.E. Shabaev, V.G. Nechaev, P.P. Zinchenko, A.V. Meznikov, A.V. Kovalenko
The method to determine specific energy consumption of cutting-loading by shearers for low coal seams in real operating conditions..... 28

V.N. Sklyarov
Experimental studies of enhanced durability rollers for mine belt conveyors..... 34

O.E. Shabaev, I.I. Bridun
Diagnosis of cutter failures of a longitudinally rotating cutting head of the heading machine type П110-04..... 39

CHEMICAL TECHNOLOGY

I.A. Udodov, N.A. Spiridonov, V.M.Pogibko, V.V. Prisedskiy
Synthesis of $PbFe_{0,5}Nb_{0,5}O_3 - BiFeO_3$ multiferroics in ambient with controlled pressure of lead oxide vapor..... 44

ANNIVERSARIES AND BIOGRAPHY

To the 90th anniversary of A.G. Ponomarenko..... 51

INFORMATION

Requirements for the papers submitted to the Editorial office..... 52

Publication Information

– The journal publishes research papers of fundamental and applied nature, information on conferences, seminars and exhibitions. It covers the activities of the leading research and design institutes, industrial and commercial companies and technology parks.
– The journal provides information support for the marketing of competitive high-tech products, projects, scientific and technical developments and high technologies in various fields of industry.
– The journal is distributed free of charge in electronic format via the Internet. It provides informational support and participates in International scientific conferences and exhibitions.
– The journal is included into "Russian Index of Science Citation" (RISC). Internet: elibrary.ru
– The journal is included in the list of peer-reviewed scientific publications of the Higher Attestation Commission (VAK) of the DPR. Internet: vak.mondnr.ru
– The editorial accepts for publication and reviews manuscripts on chemical and technical sciences, and the following groups of specialties: 05.02 – Engineering and engineering science; 05.05 – Transport, mining and construction engineering; 05.09 – Electrical engineering; 05.16 – Metallurgy and materials science; 05.17 – Chemical technology.

УДК 669.184

С.П. Еронько /д.т.н./, М.Ю. Ткачёв /к.т.н./, Б.И. Стародубцев
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ГАЗООТСОСА КИСЛОРОДНОГО КОНВЕРТЕРА С ВРАЩАЮЩИМСЯ КОРПУСОМ

Представлены новые технические решения, заложенные в конструкцию системы эвакуации дыма и газа для разработанного мини-плавильного агрегата с вращающимся корпусом. Рассмотрена конструкция безлопастного вентилятора, позволяющая повысить эффективность работы комплекса газоочистки кислородного конвертера и исключить попадание продуктов сгорания в окружающее пространство. Приведены результаты лабораторных исследований данного устройства, на основании которых установлены преимущества, свидетельствующие о перспективности его внедрения в производственный процесс.

Ключевые слова: *кислородный конвертер, газоочистка, эффект Коанда, эвакуация пыли и газов, безлопастной вентилятор, дымосос радиального типа.*

Постановка проблемы

Любой сталеплавильный процесс сопровождается интенсивным выделением газов, содержащих большое количество мелкодисперсной пыли.

Как известно, в состав конвертерных газов, образующихся при выплавке стали по классической технологии, входит до 85 % CO. При этом конструктивное исполнение системы газоочистки кислородного конвертера зависит от того, используется ли в дальнейшем в качестве топлива содержащаяся в отходящей газовой смеси окись углерода. Поэтому существует две схемы отвода газа от конвертера, одна из которых предполагает предварительное дожигание CO в камине (вертикальном или наклонном газоходе), охлаждение, очистку от пыли и выброс в атмосферу продуктов сгорания. Вторая схема обеспечивает охлаждение, очистку отводимых от плавильного агрегата газов и подачу их в специальные емкости (газгольдеры) с последующим использованием в качестве топлива [1]. Ни одна из указанных схем не отвечает условиям процесса выплавки стали в конвертере с корпусом, вращающимся относительно своей продольной оси, наклоненной под углом 17-25º к горизонтальной плоскости.

К особенностям такого сталеплавильного процесса следует отнести полное сгорание CO в рабочем пространстве агрегата, а также наличие нескольких подвижных сопряжений элементов системы газоотсоса, непосредственно примыкающих к его горловине и вызывающих значительную утечку неочищенных газов в окружающую среду.

Анализ последних исследований и публикаций

Результаты выполненного литературного обзора [2,3] и проведенных патентных исследований [4,5] свидетельствуют о том, что в поисках альтернативы радиальным и осевым вентиляторам, имеющим уже 180-летнюю историю, за рубежом активизированы экспериментальные и теоретические изыскания, связанные с созданием вентиляторных устройств, обеспечивающих направленное движение газовых потоков без применения рабочих колес с закрепленными лопатками. Речь идет о так называемых безлопастных вентиляторах, принцип действия которых основан на эффекте Коанда.

Первенство в практической реализации безлопастного вентилятора принадлежит британцу Джеймсу Дайсону, предложившему использовать в вентиляторной системе пустотелое кольцо с поперечным сечением, схожим с профилем самолетного крыла, при этом на внутренней его поверхности по всему периметру расположена щель зазором 0,5…5 мм. Через эту щель с помощью турбины, размещенной в основании вентилятора, с огромной скоростью вытесняется воздух, поток которого плавно огибает внутренний аэродинамический профиль и создает в центре кольца область разряжения, благодаря чему воздушная масса втягивается с периферии и сливается с первичным потоком, образуя струю, выталкиваемую вперед из кольца и увеличивающую объем воздуха на выходе в 10…20 раз. Средством для создания потока воздуха через сопло вентилятора Дайсона может быть не только турбина, но и компрессор. Однако следует

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

отметить то обстоятельство, что при изготовлении кольцевого сопла со сложной конфигурацией профиля затруднительно выдержать жесткие допуски на размеры, в связи с чем его диаметр не превышает 600 мм, т.е. такая вентиляторная система нашла применение пока только в быту. В связи с этим для использования безлопастного вентилятора в промышленных установках газоотсоса, когда диаметр его сопла может достигать 2-х метров, необходимо иное конструктивное исполнение сопловой части вентиляторной системы такого типа.

Цель (задачи) исследования

Одной из задач, подлежащих решению при создании усовершенствованного кислородного конвертера с вращающимся корпусом для переработки некачественной шихты и металлсодержащих отходов, является модернизация его системы газоотвода. Для достижения поставленной цели нужны новые технические решения, способствующие повышению эффективности эвакуации конвертерных газов, при которой бы устранялся их выход в окружающее пространство через зазоры между подвижно сопрягаемыми элементами системы газохода во время ведения плавки, а также скачивания шлака или его отсечки в процессе выпуска стали в разливочный ковш, когда горловина плавильного агрегата отвернута от колпака вниз [6].

Основной материал исследования

На кафедре механического оборудования заводов черной металлургии Донецкого национального технического университета в 2014 году начаты работы по проектированию безлопастного вентилятора и изучению возможности его использования в системах газоотсоса в условиях сталеплавильного производства. В результате была предложена и запатентована [7] новая конструктивная схема (рис. 1) сопловой части вентилятора, предусматривающая ее формирование из комплекса полых сегментов 4, имеющих контур внешней поверхности, аналогичный форме продольного сечения полого кольца вентиляторной системы Дайсона. Данные сегменты размещены на кольцевой оправке с возможностью относительного поворота на определенный угол в радиальной плоскости, а их полости сообщаются посредством гибких трубок 3 с воздухораспределительным коллектором 2, выполненным в виде тора. На входе горловины, образованной кольцевыми сегментами 4, размещен завихритель потока, включающий полые сегменты 5 с щелевыми соплами и внутренней поверхностью Коанда, закрепленные последовательно по окружности на несущей скобе в плоскости, перпендикулярной продольной оси горловины, при этом полости сегментов 5 посредством трубопроводов 7 сообщаются с полостью 2-й торообразной воздухораспределительной камеры 6. Обе распределительные камеры снабжены патрубками 1 и 8 для подключения их к источнику сжатого воздуха.

Отсутствие на данный момент теории расчета вновь созданного узла безлопастного вентилятора предопределило необходимость проведения лабораторных исследований на физических моделях с целью получения исходной информации для проверки возможности его встраивания в модернизируемую систему газоотсоса кислородного конвертера с вращающимся корпусом.

В ходе модельных исследований в качестве оценочных критериев эффективности функционирования безлопастного вентилятора приняли расходные и скоростные характеристики газовых потоков, возбуждаемых с его помощью. Лабораторные эксперименты проводили в три этапа. Вначале по методике, подробно освещенной в работе [8], получили информацию о достигаемых значениях коэффициента умножающего эффекта, под которым в специальной литературе считают отношения объемного расхода газовой смеси на выходе из горловины вентилятора к объему воздуха, подаваемого в единицу времени в его полые сегменты. Для этого с использованием плоской прозрачной модели, включавшей два сегмента вентилятора с конструктивными параметрами (рис. 2): α=15º, β=25º, γ=45º, δ=0,7 мм, B=50 мм, d=85-205 мм, в полости которых под избыточным давлением в пределах 50-150 кПа компрессором с заданным расходом, контролируемым с помощью ротаметра, подавали воздух и с использованием специального зонда измеряли скорость газовоздушного потока, формировавшегося на выходе из горловины плоской модели вентиляторной системы.

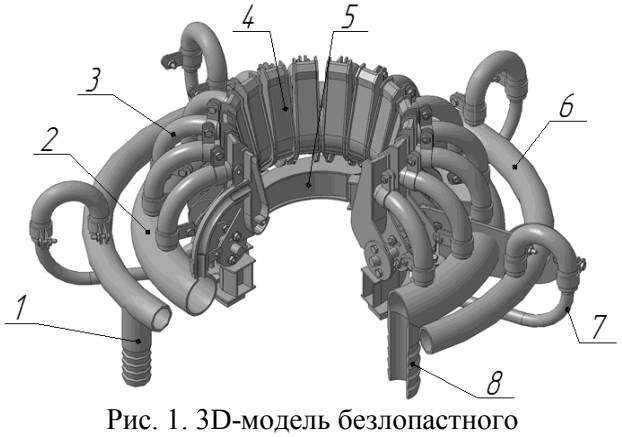


Рис. 1. 3D-модель безлопастного вентилятора

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Его визуализацию на темном фоне обеспечивали светлым дымом, поступавшим из генератора, расположенного ниже модели. Измерительный зонд включал тензорезисторный преобразователь – упругую пластину с наклеенными фольговыми датчиками, консольно закрепленную одним своим концом в цилиндрическом стеклянном баллончике, а вторым концом связанную с рычагом, несущим приемный элемент в виде диска диаметром 10 мм. Зонд позволял преобразовать значение динамического давления, действующего на его приемный диск со стороны газовоздушного потока, в аналоговый сигнал, пропорциональный плотности и скорости во второй степени движущейся среды.

Для обеспечения контроля в режиме реального времени записи регистрируемого сигнала и последующего анализа его формы и значения в измерительную систему входили также усилитель переменного тока, аналого-цифровой преобразователь и ЭВМ с печатающим устройством. По результатам измерений, погрешность которых, по данным статистической обработки, не превышала 5 %, были построены поля скоростей (v, м/с), зафиксированных в поперечном сечении газовоздушного потока на выходе из горловины плоской модели исследуемого вентилятора (рис. 3) и дающих возможность рассчитать осредненные значения обеспечиваемых ею объемных расходов. Отношение этих значений и соответствующих им показаний ротаметра о расходе рабочего воздуха, подававшегося в полые сегменты модели вентилятора, позволили определить обеспечиваемый ею коэффициент умножающего эффекта (данные табл. 1). Значение этого коэффициента, находящееся в пределах 3,6-10,5, в значительной мере зависит от давления воздуха, поступающего в полости сегментов с поверхностью Коанда.

На втором этапе экспериментальных исследований проводили стендовое испытание опытного образца безлопастного вентилятора, изготовленного с учетом рациональных значений его конструктивных параметров, проверенных на плоской физической модели. Во время тестирования работы новой вентиляторной системы с использованием скоростной видеосъемки осуществили фиксацию картин развития газодинамических процессов, протекающих в зоне размещения безлопастного вентилятора, находящегося на различном удалении от источника дыма. Для этого вентилятор предварительно закрепляли на трех вертикальных стойках над раздвоенным щелевым соплом, формирующим расходящиеся под заданным углом два направленных потока дыма, поступавшего от специального

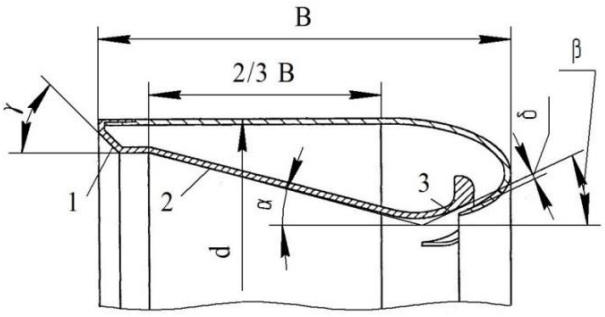
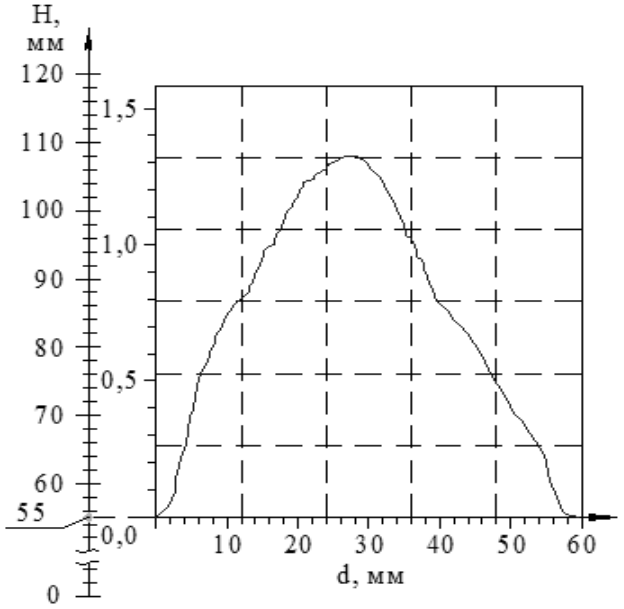
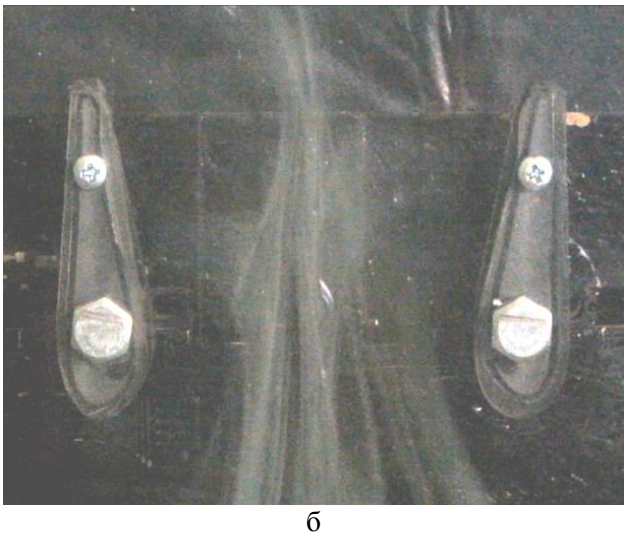


Рис. 2. Основные геометрические параметры профиля сегмента модели вентилятора: *1* – скошенная поверхность; *2* – диффузор; *3* – поверхность Коанда



а



б

Рис. 3. Поля скоростей газовоздушного потока на различном удалении от выхода горловины плоской модели вентиляторной системы – *а* и визуализированная картина в зоне формирования – *б* при давлении и объемном расходе энергоносителя 50 кПа и 8 л/мин

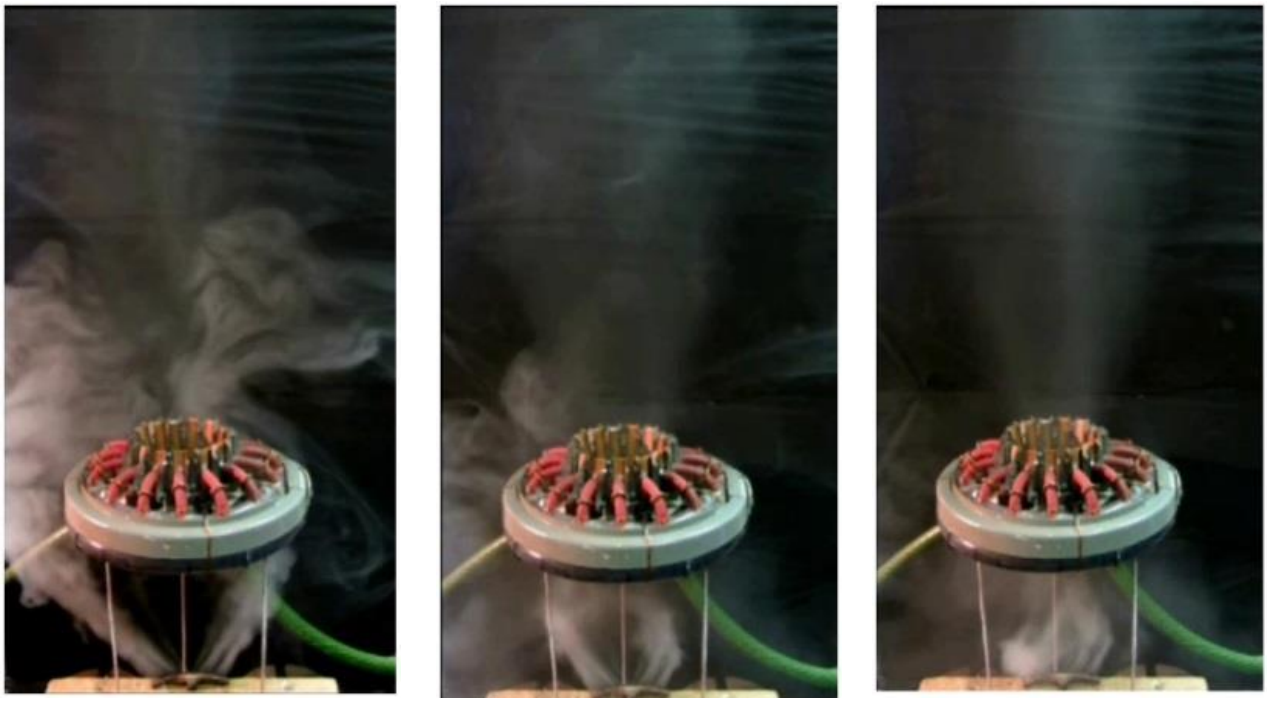
ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Табл. 1. Скоростные и расходные характеристики работы плоской модели безлопастного вентилятора

Значение параметров работы модели вентилятора		Осредненная скорость потока эвакуируемой газовоздушной смеси, м/с	Объемная производительность модели вентилятора, л/мин	Значение коэффициента умножающего эффекта вентилятора
Давление воздуха, кПа	Расход воздуха, л/мин			
50	8	0,8	28,8	3,6
	10	1,1	39,6	3,9
	12	1,3	46,8	3,9
100	8	1,4	50,4	6,3
	10	1,8	64,8	6,5
	12	2,2	79,2	6,6
150	8	2,3	82,8	10,4
	10	2,9	104,4	10,4
	12	3,5	126	10,5

генератора, включавшего заполненную тлеющими древесными опилками металлическую гильзу и дымосос радиального типа. Угол отклонения от вертикали потоков дыма, истекавших из щелевых сопел, был подобран с учетом геометрических параметров вентилятора с таким расчетом, чтобы дымовые струи не имели прямого попадания в его горловину. Благодаря этому моделировались неблагоприятные начальные условия работы вентиляторной системы (фото на рис. 4а). После запуска вентилятора отрабатывали различные режимы его функционирования, предусматривающие эвакуацию дыма при отключенном завихрителе потоков (фото на рис. 4б) и его задействовании (фото на рис 4в).

Анализ просмотренных в динамике и в режиме «стоп-кадр» видеозаписей, полученных для всего диапазона измерений удаленности вентилятора от источника дыма (раздвоенного щелевого сопла), свидетельствует о том, что максимальная эффективность функционирования системы безлопастного вентилятора обеспечивается в случае одновременной работы ее узлов возбуждения и завихрения газовоздушных потоков при определенном соотношении объемов воздуха, подаваемых в единицу времени в полости элементов, образующих указанные узлы.



а б в

Рис. 4. Характерные картины потоков дыма, наблюдавшиеся при различных режимах функционирования безлопастного вентилятора

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

В частности, для тестируемого безлопастного вентилятора данное соотношение составило 3:2. При таком соотношении зафиксированы максимальные значения коэффициента умножающего эффекта, составлявшие 10-15, а также проявляется эффект торнадо.

На третьем этапе модельных исследований провели серию экспериментов с целью подтверждения возможности применения безлопастного вентилятора в модернизированной системе газоотсоса конвертера с вращающимся корпусом. В соответствии с ее структурной схемой, приведенной на рисунке 5, в ней наряду с центробежным дымососом 11 предусмотрено использование дополнительного вентилятора безлопастного типа 7. При этом дымосос, установленный непосредственно перед дымовой трубой 12, обеспечивает прокачку отводимых от кислородного конвертера 1 газов через аккумулятор тепла 8, скруббер 9 и рукавный фильтр 10. А безлопастной вентилятор 7, размещенный над вертикальным воздушным холодильником 5 и охватывающий его выходной носок 6, предназначен для эвакуации газопылевой смеси, попадающей в окружающее пространство в те промежутки времени, когда горловина конвертера отведена от колпака 2, через отверстие верхней торцевой части которого заведена наклонная кислородная фурма 4, закрепленная на ходовой тележке 3 и совершающая качательные движения при реализации технологического процесса.

С целью проверки правильности принятых конструктивных решений еще на стадии проектирования, качественной и количественной оценки эффективности функционирования предложенного образца системы, обеспечивающей отвод газа от кислородного конвертера, изготовили в масштабе 1:10 модельный комплекс оборудования (фото на рис. 6), состав и последовательность размещения структурных элементов которого в точности соответствует схеме, показанной на рис. 5.

Известно, что в процессе выплавки стали в конвертере с корпусом, вращающимся относительно наклонной продольной оси, происходит полное дожигание CO до CO_2. При этом расход кислорода должен составлять 60 м^3 кислорода на 1 т чугуна, а объем конвертерного газа в м^3 за время плавки может быть выражен формулой, приведенной в работе [1]:

$$V_{кг} = 18{,}66 \cdot (C_1 - C_2) \cdot G,$$

где C_1 и C_2– содержание углерода в металле в начале и конце продувки, %; G – масса садки конвертера, т.

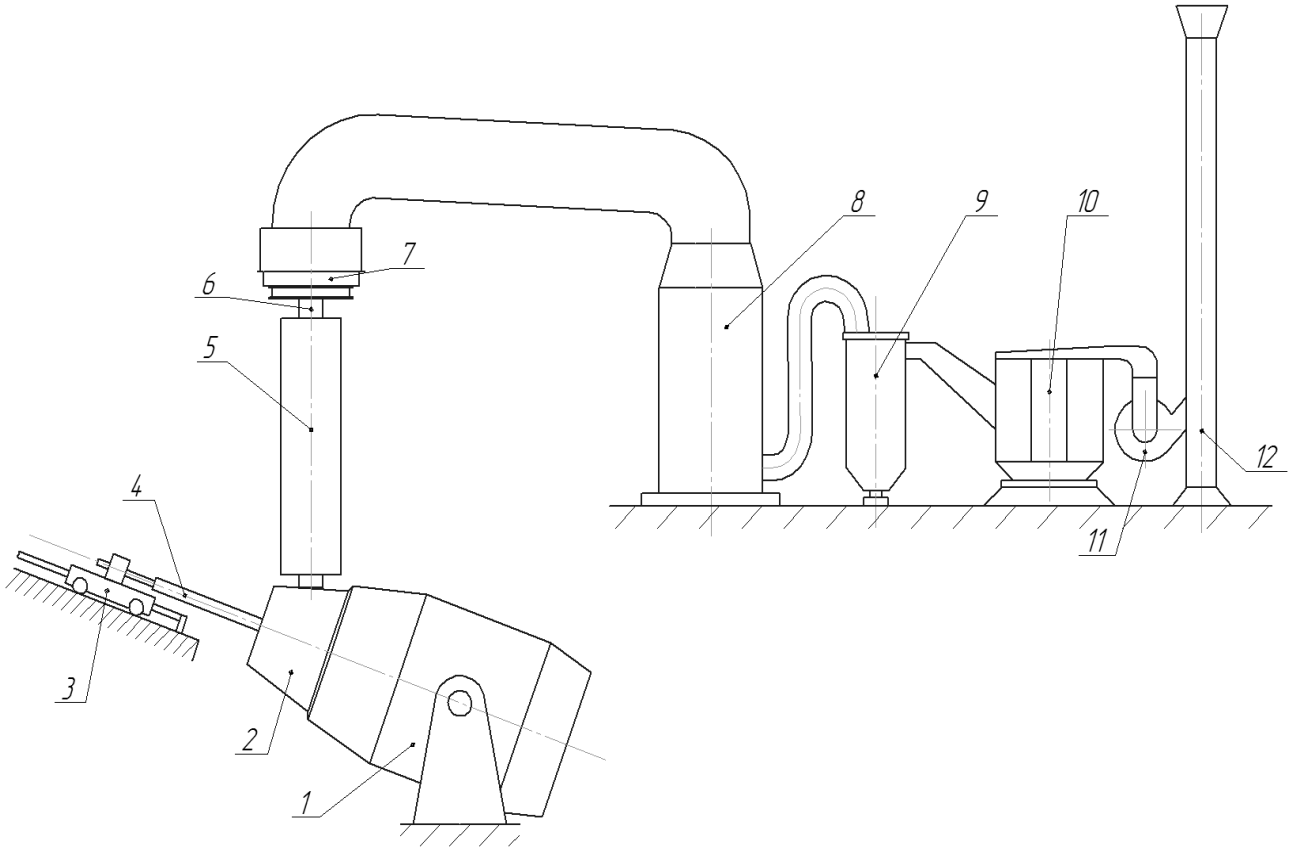


Рис. 5. Структурная схема модернизированной системы газоотсоса кислородного конвертера с вращающимся корпусом

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

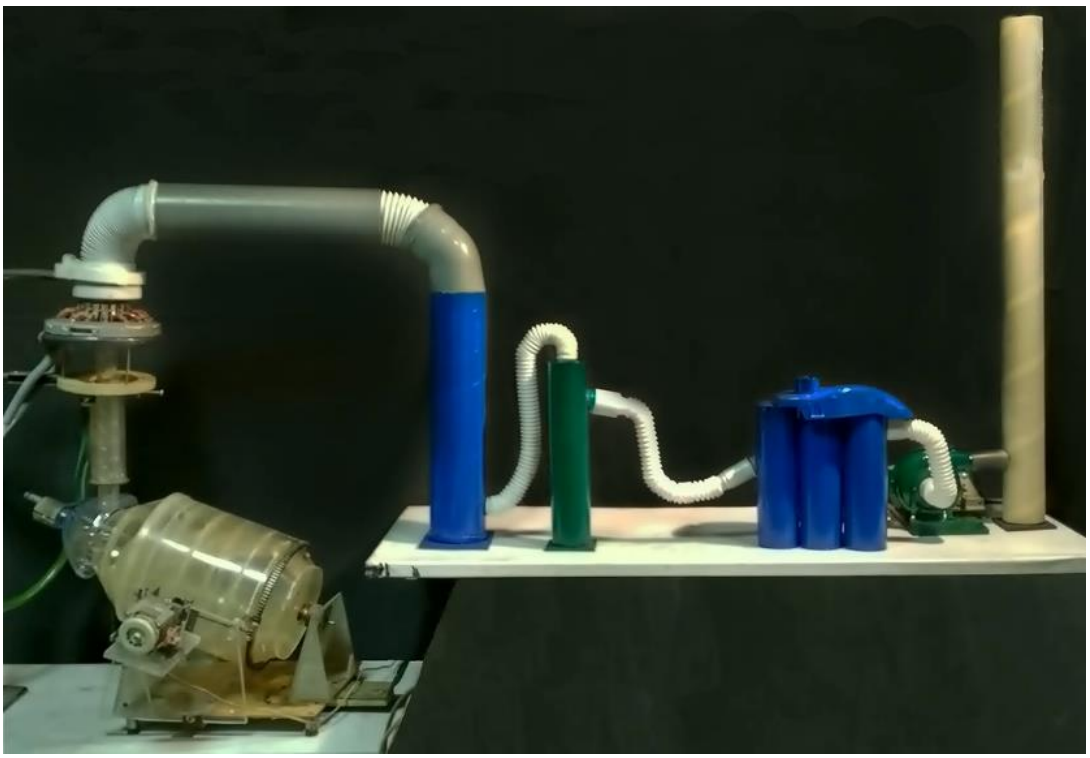


Рис. 6. Общий вид модельного комплекса системы газоотсоса

Для условной работы 10-тонного конвертера с продолжительностью продувки чугуна кислородом 30 мин система газоотсоса должна обеспечивать удаление 0,4 м^3 газовой смеси в секунду. Поскольку линейный масштаб уменьшения модели 10-тонного конвертера составляет m_c=10, то секундный объем отсасываемых из нее газов должен быть меньше в 10^3 раз по сравнению с натуральным образцом плавильного агрегата, т.е. 0,4 л/с.

Для указанной производительности рассчитали и изготовили модель центробежного дымососа, приводимого в действие электродвигателем постоянного тока с регулируемой частотой вращения вала. Затем с использованием жидкостного манометра, подключаемого к всасываемому патрубку дымососа, и газового расходомера, размещенного на его выхлопном патрубке, провели серию измерений, результаты которых позволили получить характеристику, устанавливающую связь между разряжением P_B и производительностью Q при заданном числе оборотов рабочего колеса. В характеристике вентилятора имеются две особые точки, одна из которых соответствует его холостому ходу, а другая холостому расходу. Первая точка имеет координаты P_B=$P_{B\,max}$ и Q=0, а это означает, что вся энергия, сообщаемая приводным двигателем рабочему колесу, расходуется на создание разрежения во всасывающем патрубке в случае полного перекрытия его сечения. Вторая точка с координатами P_B=0 и Q=Q_{max} характерна для самостоятельной работы вентилятора, т.е. без подключения его к сети или устройству. В этом режиме функционирования вентилятора вся энергия, подводимая к его рабочему колесу, затрачивается на перемещение газовой среды и компенсацию потерь при ее прохождении через сам вентилятор. Естественно, что все возможные варианты работы вентилятора на газоотсос будут определяться положением линии P_B=$f(Q)$, построенной по координатам промежуточных точек. С учетом того, что планом эксперимента предусматривалась возможность регулирования работы модели дымососа, были получены значения, по которым построили графики (рис. 7), соответствующие

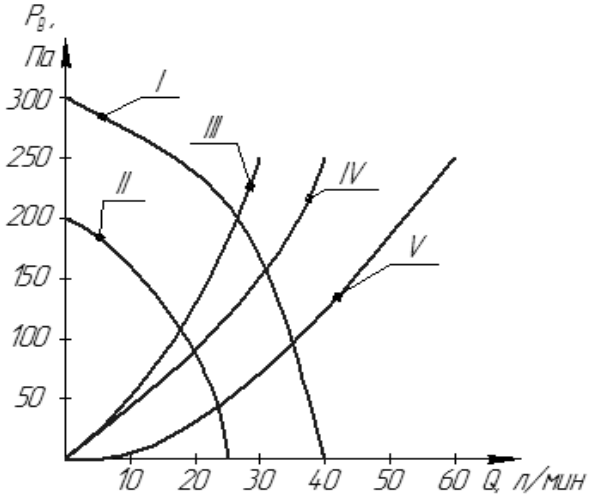


Рис. 7. Полученные характеристики моделей дымососа – *I,II* и обслуживаемой им сети – *III, IV, V*

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

двум скоростям вращения ее колеса 1500 об/мин (I) и 1000 об/мин (II).

Поскольку исследуемая модельная система состоит из вентилятора и сети, которую он обслуживает, приведенные на этом рисунке зависимости дополнены характеристикой, устанавливающей связь между аэродинамическим сопротивлением модели сети и расходом газа в ней, т.е. $\Delta P_{\Sigma} = f(Q)$. Характеристика модели сети учитывает все виды сопротивления на пути движения газового потока от горловины модели конвертера до всасывающего патрубка модели дымососа. В соответствии с планом эксперимента предполагалось изменение характеристики сети (кривые III, IV, V) за счет увеличения гидравлического сопротивления модели рукавного фильтра посредством применения в нем тканей с различной газопропускной способностью, благодаря чему можно имитировать работу системы газоотсоса в процессе накопления пыли на поверхности матерчатых рукавов.

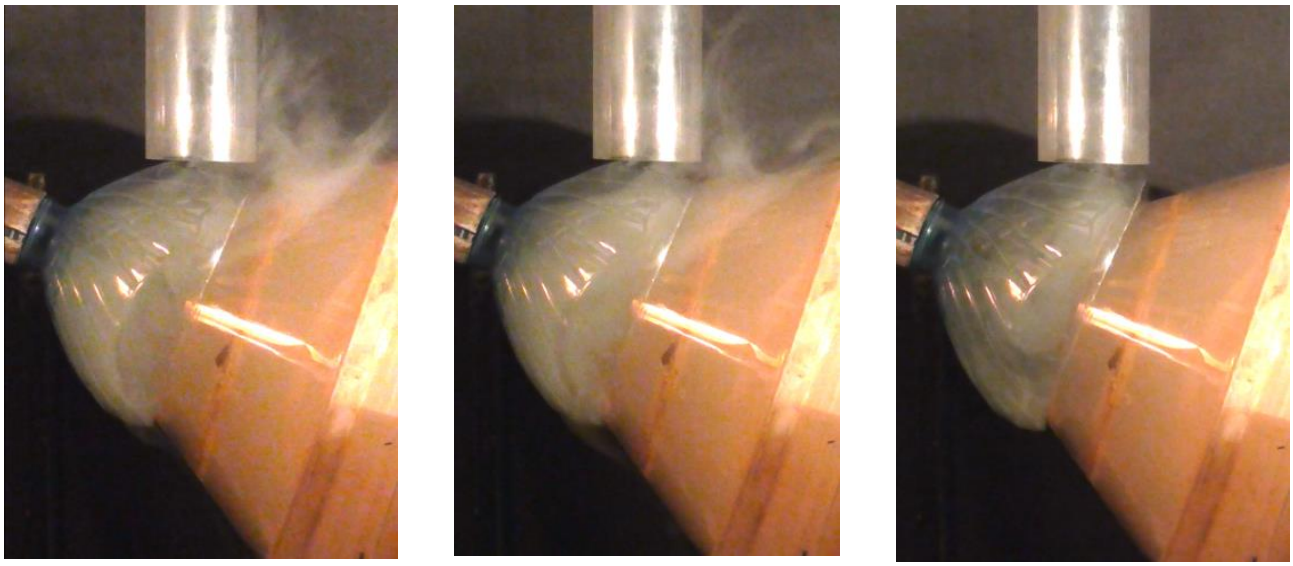
В ходе физического моделирования работы предложенной системы газоотсоса в полость модели кислородного конвертера через наклонную фурму с указанным расходом, контролировавшимся ротаметром, специальным насосом закачивали дым, позволяющий визуализировать картину распределения газовых потоков вблизи горловины модели сталеплавильного агрегата, интенсивность и траектории которых давали возможность качественно оценить эффективность эвакуации газов по предлагаемой схеме с использованием безлопастного вентилятора в комплексе с дымососом (центробежным вентилятором).

Для последующего сравнительного анализа во время симуляции процессов, протекающих в каналах элементов моделируемой системы эвакуации газов, с помощью видеокамеры осуществляли скоростную видеосъемку картин распределения потоков светлого дыма, наблюдавшихся через прозрачные стенки моделей горловины конвертера, примыкающего к ней колпака и вертикально установленного воздушного холодильника.

Во время проведения видеосъемки имитировали несколько вариантов функционирования исследуемой системы, предполагающих реализацию процесса эвакуации дыма при раздельной и совместной работе дымососа и безлопастного вентилятора.

Количество (объем) газа, образующегося в разные периоды плавки стали в кислородном конвертере, напрямую зависит от скорости выгорания углерода, т.е. является переменным, поэтому производительность дымососа должна быть равной или несколько больше максимальной интенсивности выделения газовой фазы в полости плавильного агрегата. При этом по ходу ведения технологического процесса, когда суммарный объем образующихся газов и дыма резко уменьшается, прибегают к снижению производительности дымососа.

Наиболее экономичным способом регулирования объема отсасываемого газа, как известно, считают тот, который предусматривает ступенчатое изменение скорости вращения рабочего колеса дымососа. В связи с этим вначале осуществляли проверку функционирования модельного комплекса в условиях, когда в его работе



а б в

Рис. 8. Характерные картины распределения потоков дыма вблизи горловины модели конвертера при имитации процесса газоотсоса с использованием центробежного вентилятора

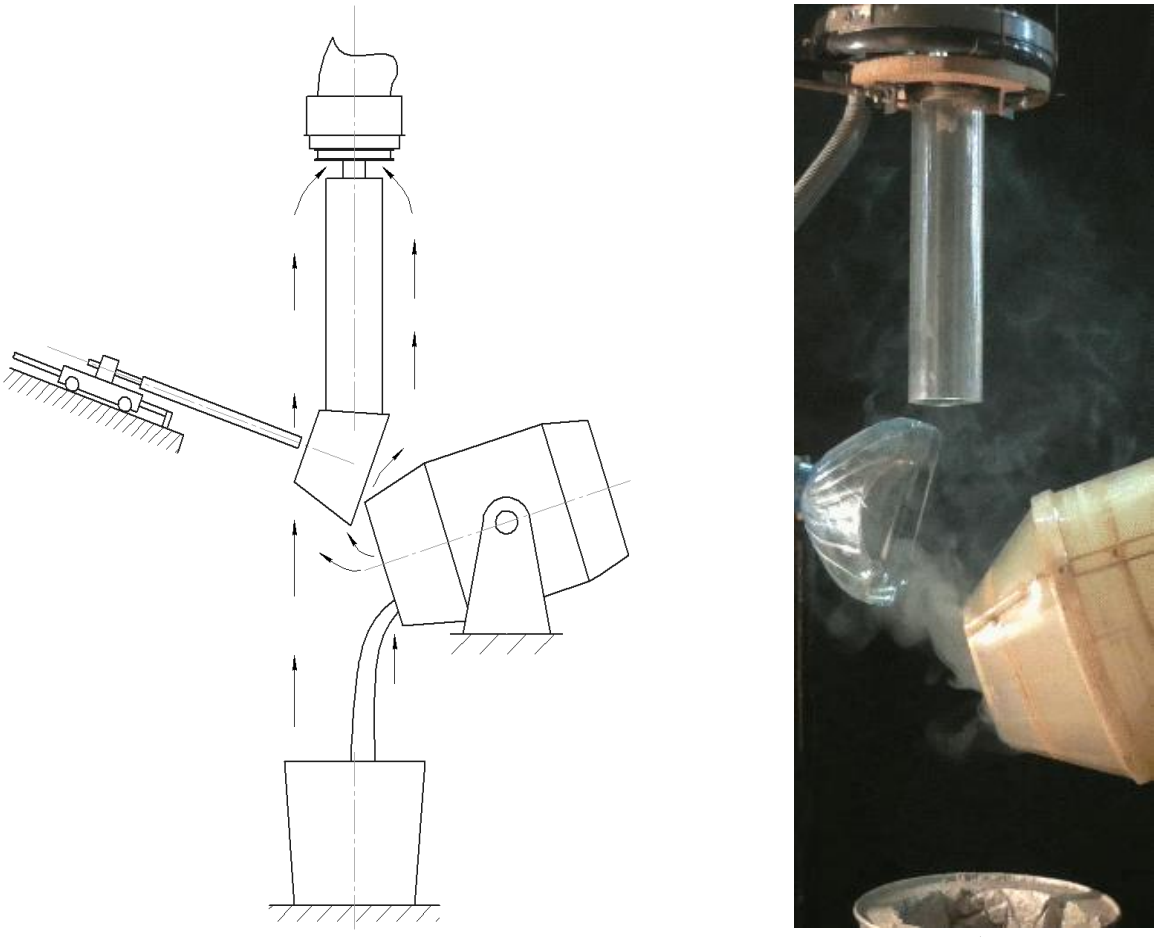
ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

был задействован только центробежный вентилятор.

Просмотр отснятого видеоматериала в динамике и режиме «стоп-кадр» позволил установить главные особенности развития и движения потоков газа вблизи имевшихся зазоров в сочленениях элементов модели дымохода, а также в местах резкого изменения направления его канала. На рис. 8 приведены характерные картины потоков дыма, наблюдавшиеся вблизи зазора между горловиной модели конвертера и пристыкованного к ней колпака.

Результаты визуального контроля свидетельствуют о том, что, несмотря на экономичность, способ регулирования производительности дымососа путем ступенчатого изменения числа оборотов его колеса не обеспечивает гибкой подстройки системы газоотсоса к изменяющимся условиям работы. Так, при резком увеличении количества выделяющегося дыма, когда производительность дымососа оказывалась недостаточной и в окружающее пространство через зазоры попадали и газы (рис. 8а), перевод вентилятора на большую скорость вызывал различный эффект в зависимости от характеристики обслуживаемой сети. Если ее рукавный фильтр имел повышенное гидравлическое сопротивление, дымосос не обеспечивал требуемого разрежения в полости колпака, состыкованного с горловиной модели конвертера, и через зазор между ними часть дыма все же попадала за пределы дымохода (рис. 8б). При пониженном гидравлическом сопротивлении модели рукавного фильтра, после увеличения скорости вращения колеса дымососа, наблюдался подсос воздуха через существующие зазоры в газоотводящий тракт (рис. 8в), что также является нежелательным последствием.

Поэтому заключительный этап модельных исследований был связан с изучением возможности использования безлопастного вентилятора в качестве дополнительного средства, позволяющего при работе в комплексе с дымососом обеспечить режим функционирования системы эвакуации конвертерных газов и дыма, при котором в наибольшей мере исключается их попадание в окружающую среду без надлежащей очистки. На основании результатов серии



а б

Рис. 9. Траектория движения газовых потоков во время слива металла из конвертера в ковш при одновременной работе безлопастного вентилятора и дымососа на схеме – *а* и на физической модели – *б*

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

экспериментов, проводившихся при различных комбинациях значений параметров, влияющих на эффективность газоотсоса из рабочего пространства модели кислородного миниконвертера, корпус которого во время реализации сталеплавильного процесса совершает вращение относительно своей продольной оси, наклоненной под углом 16-20º к горизонтальной плоскости, были выданы практические рекомендации относительно режимов работы и порядка включения в нее центробежного дымососа и безлопастного вентилятора, входящих в состав модернизированной системы эвакуации и очистки конвертерных газов.

По ходу ведения сталеплавильного процесса водоохлаждаемый колпак и горловина конвертера могут занимать различное относительное положение при выполнении требуемых технологических операций. Во время продувки ванны с переменной интенсивностью кислородом колпак примыкает к горловине, а верхняя часть камина, коаксиально расположенная относительно сопла безлопастного вентилятора, заведена в отверстие газохода. Отсос конвертерных газов и дыма осуществляет дымосос, скорость вращения рабочего колеса которого должна быть такой, чтобы исключался выход газа через зазоры в окружающую среду или, наоборот, подсос воздуха в систему.

В ходе проведения скачивания шлака или его газодинамической отсечки при выпуске металла в разливочный ковш камин (рис. 9) должен быть опущен в нижнее положение, в котором его верхняя часть будет выведена из отверстия газохода.

В него с помощью запущенного безлопастного вентилятора закачивают газопылевую смесь, попавшую из конвертера и разливочного ковша в окружающее пространство. При одновременной работе дымососа и безлопастного вентилятора их производительности должны быть одинаковыми, что достигают посредством регулирования числа оборотов колеса центробежного вентилятора и объема воздуха, подаваемого в единицу времени к узлам формирования и завихрения потоков безлопастного вентилятора.

Благодаря такому порядку совместной работы дымососа и безлопастного вентилятора можно в значительной мере сократить объем вредных выбросов в окружающее пространство в тех случаях, когда горловина корпуса кислородного конвертера не состыкована с колпаком. Это обеспечивается за счет возбуждения вертикально направленных восходящих газовых потоков, вызванных эффектом торнадо, возникающим при функционировании узла завихрения безлопастного вентилятора [9].

Выводы

Таким образом, качественные и количественные результаты модельных исследований эффективности функционирования модернизированной системы газоотсоса кислородного ковертера с вращающимся корпусом дают возможность еще на этапе конструкторно-технологической проработки нового технического решения исключить нерациональные варианты схем компоновки структурных блоков, обеспечивающих направленную циркуляцию выбросов газа и дыма.

В дальнейших исследованиях такой системы газоотсоса следует изучить вопрос о влиянии на ее надежность пылевых частиц, находящихся в отсасываемых газах и способных вызвать интенсивный абразивный износ металлических поверхностей полых сегментов узлов формирования и завихрения потоков безлопастного вентилятора.

Список литературы

1. Бойченко, Б.М. Конверторное производство стали: теория, качество стали, конструкции агрегатов, рециркуляция материалов и экология / Б.М. Бойченко, В.Б. Охотский, П.С. Харламин. – Днепропетровск: РВА «Днепро-ВАЛ», 2006. – 454с.
2. Miozzi, M. Experimental investigation of a free-surface turbulent jet with Coanda effects / M. Miozzi, F. Lalli, G.P. Pomano // Experiments in Fluids. – 2010. – Vol. 49. Issue 1. – P. 341-353.
3. Dragan, V. A new mathematical model for high thickness Coanda effect wall jets / V. Dragan // Review of the Air Force Academy. – 2013. – Issue 1(23). – P. 23-28.
4. Патент 2458254 РФ, F04D25/08. Вентилятор / П.Д. Гэммак, Ф. Николас, К.Д. Симмондз; Дайсон Текнолоджи Лимитед (GB); № 201012706/06, заявл. 10.10.2011; опубл. 10.08.2012.
5. Патент 2484383 РФ, F24F1/02. Вентилятор / Ф. Николас, К.Д. Симмондз; Дайсон Текнолоджи Лимитед (GB); № 2011128308/12, заявл. 27.01.2013; опубл. 10.06.2013.
6. Еронько, С.П. Перспективы и проблематика создания мини-агрегата для переработки некачественной шихты и металлсодержащих отходов / С.П. Еронько, Н.А. Климович // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». – 2016. – № 5. – С. 26 -31.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

7. Патент 2630443 РФ, МПК F24F 7/00. Узел безлопастного вентилятора эвакуации газопылевых выбросов из промышленных агрегатов / Е.Н. Смирнов, С.П. Еронько, М.Ю. Ткачёв и др.; заявл. 23.05.2016, опубл. 07.09.2017. Бюл. № 25.
8. Исследование на физической модели возможности использования принципа вентилятора Дайсона в системах газоотсоса металлургических агрегатов / С.П. Еронько, М.Ю. Ткачёв, А.С. Сосонкин и др. // Металлургические процессы и оборудование. – 2014. – № 2. – С. 51-59.
9. Еронько, С.П. Моделирование газоотсоса от плавильных агрегатов с использованием безлопастных вентиляторов / С.П. Еронько, М.Ю. Ткачёв, Б.И. Стародубцев // Вестник института гражданской защиты Донбасса: научный журнал. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – Выпуск 3(3). – С. 15-19.

S. P. Eron'ko /Dr. Sci. (Eng.)/, M.Yu. Tkachev /Cand. Sci. (Eng.)/, B. I. Starodubtsev
Donetsk National Technical University (Donetsk)

THE SIMULATION OF THE UPGRADED SYSTEM OF THE OXYGEN VESSEL GAS SUCTION WITH A ROTATING FRAME

Background. *One of the tasks to be solved while creating a mini-melting unit with a rotating frame is to upgrade its gas suction system, stipulating the integrated use of the centrifugal exhauster and the so-called bladeless fan. The absence of a theory of calculation of parameters of this fan type determined the need to conduct model studies of its work in various modes of operation of the system for removing gas and dust during the steelmaking process in the oxygen vessel.*
Materials and/or methods. *During the laboratory experiment the technique of physical modeling used, in which with the test equipment and high-speed video recording the information received about the functioning parameters of the model complex simulating the operation of the upgraded system of the oxygen vessel gas suction with a rotating frame.*
Results. *On the basis of experimental data recommendations developed for the rational use of ventilation devices during the process operations at different relative position of the melting unit, the ladle and the flue parts immediately adjacent to the vessel mouth.*
Conclusion. *The modeling results confirm the correctness of the decisions, laid down in the upgraded gas suction system of the oxygen vessel, and allow, at the design stage, choosing its rational variants of application, enabling to minimize the amount of harmful emissions into the environment during the melting in the oxygen vessel.*

Keywords: *oxygen vessel, gas purification, Coanda effect, dust and gases evacuation, bladeless fan, radial type exhauster.*

Сведения об авторах

С.П. Еронько
SPIN-код: 5911-0900
Author ID: 6701708282
ORCID iD: 0000-0002-5806-4723
Телефон: +380 (95) 762-39-33
Эл. почта: ersp@meta.ua

М.Ю. Ткачёв
SPIN-код: 9855-0447
Author ID: 57189358257
ORCID iD: 0000-0001-5795-9595
Телефон: +380 (95) 360-92-22
Эл. почта: mishel-tkachev@ya.ru

Б.И. Стародубцев
SPIN-код: 6417-7407
Телефон: +380 (71) 316-25-63
Эл. почта: starbor45@gmail.com

Статья поступила 29.12.2017 г.
© С.П. Еронько, М.Ю. Ткачёв, Б.И. Стародубцев, 2017
Рецензент д.т.н., проф. А.Б.Бирюков

УДК 621.771.294

С.А. Снитко /к.т.н./, А.В. Яковченко /д.т.н./, А.Л. Сотников /д.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ В КОЛЕСОПРОКАТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Применительно к прессопрокатным линиям по производству железнодорожных колес, в состав которых включены три пресса перед колесопрокатным станом, выполнено совершенствование технологических схем и конструкций рабочих органов прессов для осадки, разгонки и штамповки колесных заготовок, обеспечивающее: рациональную силовую загрузку прессов, уменьшение времени на их настройку, снижение влияния точности настройки на геометрические параметры штампуемых колесных заготовок.

Ключевые слова: *технологические схемы штамповки, колесные заготовки, конструкции рабочих органов прессов, центровка заготовок, настройка прессов.*

Постановка проблемы

В настоящее время все основные производители штампованно-катаных железнодорожных колес обеспечены непрерывнолитыми исходными заготовками с достаточно стабильными размерами и, соответственно, стабильной массой, разброс значений которой для исходных заготовок не превышает 10 кг. Это дает принципиальную возможность совершенствования традиционно применяемых схем деформирования металла, а также повышения технико-экономических показателей производства колес на прессопрокатных линиях, в состав которых включены три пресса перед колесопрокатным станом, за счет снижения припусков на механическую обработку колес, повышения точности и стабильности размеров заготовок по переходам, а также повышения производительности путем устранения узких мест производства.

Анализ последних исследований и публикаций

Прессопрокатные линии (ППЛ), введенные в эксплуатацию более 30 лет назад [1,2], предусматривали использование исходных заготовок, полученных из мартеновских слитков на слиткоразрезных станках, с большой нестабильностью размеров и массы (разновес до 40 кг) [3 и др.].

Вместе с тем технологические возможности этих ППЛ использованы не в полной мере. В ряде случаев они значительно более широкие в сравнении с возможностями новых ППЛ [4,5], что связано, прежде всего, с наличием трех однопозиционных прессов, установленных перед колесопрокатным станом, а также возможностью управления агрегатами в ручном режиме, причем независимо друг от друга.

Положительным примером модернизации технологии и оборудования является усовершенствование технологической схемы и конструкции рабочих органов пресса силой 50 МН для осадки и разгонки колесных заготовок [6] на ППЛ АО «Выксункий металлургический завод» (ВМЗ), позволившее повысить производительность линии при сохранении стабильности размеров получаемых колес.

Сущность этой технологии штамповки заключается в следующем. На стадии свободной осадки исходной заготовки на гладких плитах пресса силой 20 МН получают стабильный диаметр по боковой поверхности заготовки за счет обеспечения стабильной высоты осаженных заготовок с малым разновесом. Затем на прессе силой 50 МН выполняют центровку осаженной заготовки путем ее подъема в нижнем технологическом кольце, установленном по оси пресса. Далее одним ходом траверсы пресса выполняют осадку с разгонкой заготовки верхней плоскоконической плитой.

Для реализации этой технологии выполнены следующие мероприятия: использование цилиндрических изложниц с обточенной поверхностью; автоматизация хода траверсы на прессе силой 20 МН с целью обеспечения стабильной высоты осаженных заготовок; использование расширенных секций рольганга между прессами силой 20 МН и 50 МН; изменение конструкции кантователя между этими прессами для возможности транспортировки и кантовки осаженных на прессе силой 20 МН заготовок с увеличенным диаметром.

Применявшаяся ранее на АО «ВМЗ» и используемая сейчас на ПАО «ИНТЕРПАЙП-НТЗ» технология характеризуется низкой пропускной способностью пресса 50 МН. На этом прессе выполняют следующие операции [7]: окончатель-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

ную осадку заготовки в нижнем плавающем технологическом кольце, центровку кольца с заготовкой по оси пресса, подачу под верхнюю обжимную плиту пуансона и, вторым ходом пресса – разгонку центральной части заготовки. Кроме того, способ разгонки пуансоном нередко приводит к асимметрии заготовок, поскольку конструкция поворотного устройства не гарантирует совпадения оси пуансона с осью технологического кольца в каждом цикле разгонки.

Вместе с тем рассмотренная выше усовершенствованная технология штамповки обладает и недостатками, безусловно снижающими ее эффективность.

Первый недостаток состоит в нерациональном распределении величины суммарной деформации заготовок между технологическими операциями, следствием чего является перегрузка первого пресса (силой 20 МН), на котором выполняют предварительную осадку заготовки, и недостаточная загрузка второго пресса (силой 50 МН), на котором выполняют операцию разгонки центральной части заготовки.

Так, по существовавшей (проектной) технологии предварительная осадка на прессе силой 20 МН, которая обеспечивала удаление остатков окалины с боковой поверхности заготовок, не превышала 50 % и строго не регламентировалась.

По усовершенствованной технологии величина предварительной осадки заготовки массой 475 кг из мартеновского слитка составляла 225 мм [8], или 64 %. При использовании исходных заготовок из непрерывнолитого слитка Ø450-455 мм степень высотной деформации заготовки увеличилась до 67-68 % соответственно. Необходимая для реализации такого варианта технологии расчетная величина силы осадки равна 24,5 МН, что превышает номинальную силу пресса и может быть достигнута лишь при подаче максимального давления рабочей жидкости 31,4 МН/м^2 [9].

Как показали расчеты, увеличение степени высотной деформации заготовки с 50 % до 64-68 % приводит к росту силы, необходимой для осадки, так как в конце этого процесса (после 50 % обжатия) имеет место существенный рост площади контактной поверхности заготовки с обжимными плитами и увеличение напряжения течения металла.

В то же время технические возможности пресса силой 50 МН, на котором выполняют, как правило, лишь операцию разгонки центральной части заготовки, используются не в полной мере: глубина внедрения конической части плиты в центральную зону заготовки в основном не превышает 35 мм [9]. Необходимая для этого расчетная величина силы разгонки не превышает 20 МН.

Для уменьшения силы осадки на прессе силой 20 МН и, соответственно, получения требуемой высоты (и диаметра) заготовок потребовалось повышение температуры их нагрева до 1280 °С [8]. Также для уменьшения скорости деформации и, соответственно, силы осадки необходимо снижение скорости рабочего хода траверсы, что нерационально в связи с увеличением цикла на этом прессе и разогрева обжимных плит.

Значительная величина осадки по усовершенствованной технологии приводит к повышенному влиянию непараллельности обжимных плит пресса силой 20 МН на стабильность размеров получаемых заготовок. Установлено, что при диаметре осаженной заготовки ~840 мм [9] непараллельность обжимных плит в процессе рабочего хода-осадки не должна превышать 0,1°. При невыполнении указанного условия будет иметь место повышенная разнотолщинность (более 2 мм) и овальность заготовок после осадки, что по этой технологии недопустимо.

Усовершенствованная технология также предполагает высокие требования к точности размеров исходных заготовок. Наличие овальности непрерывнолитого слитка и косины реза у исходных заготовок способствует неравномерности деформации металла при его свободной осадке и увеличению овальности в 2-3 раза.

Известно, что для эффективного устранения овальности и получения стабильного диаметра осаженных на прессе силой 20 МН заготовок целесообразно применение плавающего калибровочного кольца, как, например, на прессе силой 50 МН. Однако в условиях промышленного производства на прессах силой 20 МН плавающее калибровочное кольцо не используется, так как в конструкции этих прессов не предусмотрен ни нижний, ни верхний выталкиватели, необходимые для удаления осаженной заготовки в случае ее «залипания» в кольце.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы, выполненной применительно к прессопрокатным линиям по производству железнодорожных колес, в состав которых включены три пресса перед колесопрокатным станом, является совершенствование технологических схем и конструкций рабочих органов прессов для осадки, разгонки и штамповки колесных заготовок, обеспечивающее рациональную силовую загрузку прессов, уменьшение времени на их настройку, снижение влияния точности настройки на геометрические параметры штампуемых колесных заготовок.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Основной материал исследования

Предложенная технологическая схема включает следующие операции (рис. 1, 2): осадку исходной заготовки в верхнем плавающем калибровочном кольце (на прессе силой 20 МН); кантовку заготовки на 180º; центровку заготовки нижним технологическим (или центровочным) кольцом (на прессе силой 50 МН); осадку в нижнем технологическом кольце (или без него) с разгонкой заготовки нижней конической плитой на прессе силой 50 МН; штамповку колесной заготовки в формовочных штампах на прессе силой 100 МН.

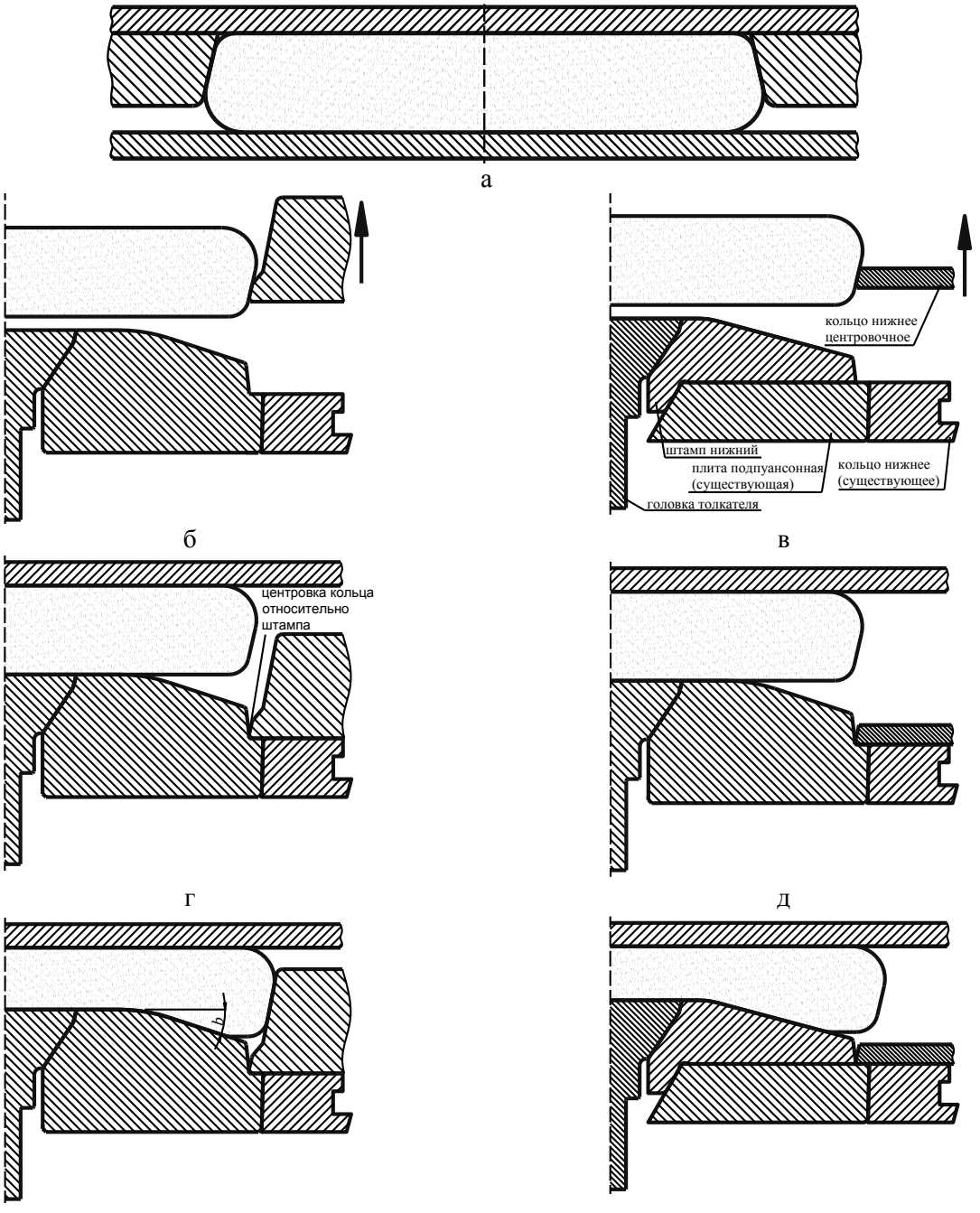


Рис. 1. Усовершенствованная технологическая схема и конструкция рабочих органов прессов на технологическом переходе «пресс силой 20 МН – пресс силой 50 МН»:
а – осадка заготовки в калибровочном кольце (пресс силой 20 МН);
б – центровка заготовки технологическим кольцом (пресс силой 50 МН);
в – центровка заготовки центровочным кольцом; *г* – первый момент осадки-разгонки (самоцентровка технологического кольца по оси нижнего штампа);
д – первый момент осадки-разгонки без технологического кольца;
е – последний момент осадки-разгонки в технологическом кольце;
ж – последний момент осадки-разгонки без технологического кольца

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

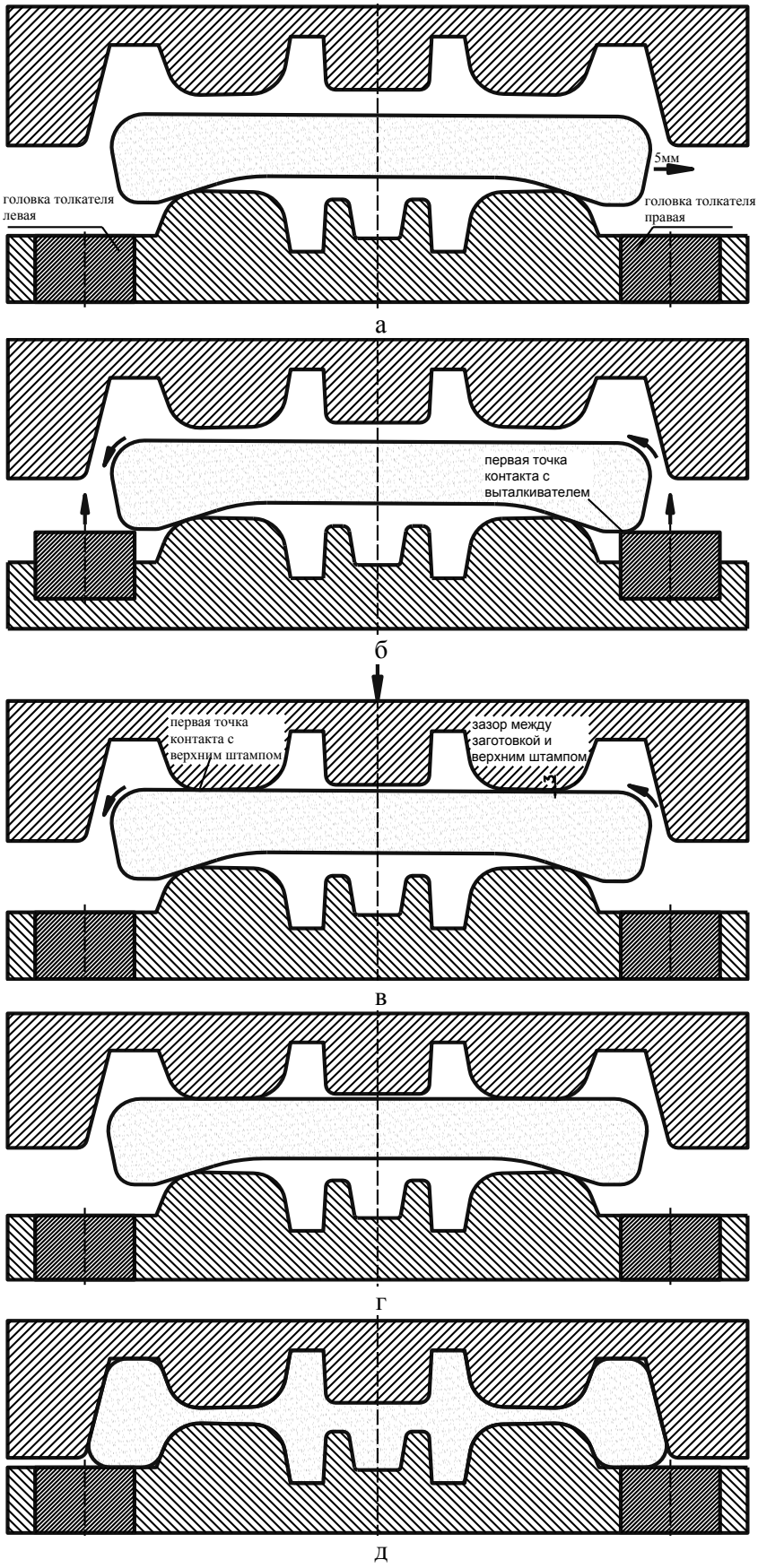


Рис. 2. Технология штамповки на прессе 100 МН: *а* – асимметричная укладка заготовки на нижний штамп; *б* – вариант центровки заготовки с помощью нижних толкателей; *в* – вариант самоцентровки заготовки за счет нажатия верхнего штампа; *г* – заготовка, установленная по оси штампов (первый момент штамповки); *д* – последний момент штамповки колесной заготовки

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

В предложенной схеме штамповки заготовок на прессе силой 50 МН предусмотрено два варианта технологии. Первый из них, традиционный, предполагает использование нижнего технологического кольца (см. рис. 1б, г, е).

По второму варианту технологии предлагается использование лишь нижнего центрирующего кольца (см. рис. 1 в, д, ж), поскольку поступающая заготовка уже имеет стабильную, калиброванную боковую поверхность, получаемую в результате применения верхнего калибровочного кольца на прессе силой 20 МН. Кроме того, данный вариант обеспечит существенную экономию металла на изготовление деформирующего инструмента пресса силой 50 МН, а также увеличит срок эксплуатации кольца, так как стойкость центрирующего кольца будет значительно выше, чем стойкость существующего технологического кольца, контактирующего с заготовкой при ее деформации. Представленная на рис. 1 схема штамповки на прессе силой 50 МН нечувствительна к точности настройки соосности верхнего и нижнего инструментов деформации, так как верхняя плита всегда гладкая, а в случае использования технологического кольца предусмотрена его самоцентровка относительно нижнего штампа по посадочной поверхности перед каждым рабочим ходом траверсы пресса. То есть в отличие от используемой на прессе силой 50 МН конструкции, кольцо не имеет возможности смещения в горизонтальной плоскости в процессе рабочего хода – осадки с разгонкой. Очевидно, это будет способствовать повышению стабильности размеров получаемых на прессе заготовок и снижению времени на настройку агрегатов ППЛ.

Предложенная конструкция технологического кольца также изменена (см. рис. 1б). Его высота увеличена с тем, чтобы рабочая поверхность кольца состояла из 2-х частей: верхней (высотой 103-110 мм), служащей для формирования боковой поверхности деформируемой заготовки (рис. 1е); нижней (высотой 40-50 мм), необходимой только для центровки поступившей на пресс силой 50 МН заготовки по ее боковой калиброванной поверхности (см. рис. 1б). При этом уклон нижней центрирующей части технологического кольца соответствует уклону рабочей поверхности калибровочного кольца на прессе силой 20 МН. Величина же уклона верхней формующей поверхности технологического кольца пресса силой 50 МН, очевидно (см. рис. 1е), может отличаться.

Новая конструкция головки нижнего толкателя пресса 50 МН имеет увеличенную на 61 мм высоту (так как заготовку необходимо выталкивать на бóльшую по сравнению с существующей технологией высоту). Кроме того, посадочная поверхность головки в нижнем штампе выполнена с бóльшим уклоном к вертикали, а также имеет второй уклон, что обеспечит в процессе эксплуатации отсутствие «просаживания» головки и «выгорания» ее кромки.

Кроме того, как показали расчеты, максимальная вертикальная сила по новой технологии не превышает 24 МН (по существующей на ПАО «ИНТЕРПАЙП-НТЗ» технологии сила осадки может достигать 48 МН), что также будет способствовать исключению «просаливания» головки толкателя в процессе работы.

Использование на прессе силой 50 МН нижнего накладного штампа (см. рис. 1в) позволит, во-первых, уменьшить расход металла на изготовление инструмента деформации (в сравнении с монолитным штампом (см. рис. 1б, г, е). Во-вторых, это позволит сократить время на перевалку (при переходе, в случае необходимости, на штамповку гладкой плитой (без разгонки) или замену нижнего штампа.

Как видно из рис. 1е, периферийная часть рабочей поверхности нижнего штампа наклонена к горизонтали под углом b. Рекомендуемая из технологических соображений величина этого угла может изменяться в диапазоне 15-25º.

На прессе силой 50 МН можно реализовывать различные варианты технологии разгонки заготовки, а на прессе силой 100 МН – различные варианты последующей центровки заготовки перед ее формовкой в штампах.

При недостаточной соосности верхнего и нижнего штамподержателей пресса силой 100 МН, а также при отсутствии механической обработки поверхности диска, целесообразно использовать меньшие величины угла b (15-17º), с тем чтобы не происходила самоцентровка заготовки при нажатии на нее верхним штампом (см. рис. 2в), а для центровки заготовок на нижнем формовочном штампе использовать установленный на прессе центрователь.

При удовлетворительной соосности верхнего и нижнего штамподержателей пресса силой 100 МН в процессе рабочего хода-формовки рекомендуется вариант технологии с использованием на прессе силой 50 МН бóльших значений угла b (18-25º). В этом случае центровка заготовки на нижнем формовочном штампе выполняется либо поднятием асимметрично уложенной заготовки (см. рис. 2а) нижними толкателями пресса (см. рис. 2б), либо, при наличии полнопрофильной обработки колес, – нажатием верхнего штампа перед началом процесса формовки (см. рис. 2в).

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Для реализации предлагаемой новой технологической схемы штамповки необходимо использовать верхнее плавающее калибровочное кольцо на прессе силой 20 МН, которое позволит устранить овальность и получить стабильный диаметр по боковой поверхности осаженных заготовок. Расчеты показали, что рациональная величина диаметра кольца находится в пределах Ø735-742 мм. Степень высотной деформации заготовок при этом будет составлять 63-65 %. В этом случае необходимая для осадки сила, с одной стороны, не превысит 20 МН, а, с другой – будет близка к максимально допустимой на прессе, что позволит соответственно в полной мере использовать технические возможности пресса и получать осаженные заготовки достаточно стабильной высоты (в том числе и без использования систем автоматизации). Дальнейшее увеличение степени высотной деформации заготовок нецелесообразно, так как после образования на боковой поверхности заготовки равномерного отпечатка калибровочного кольца наблюдается интенсивный рост силы, которая может превысить допустимую величину.

Известно, что при осадке заготовок в верхнем калибровочном кольце возможно их «залипание».

Выполним анализ использования нижних плавающих технологических колец на прессе силой 50 МН. При величине угла рабочей поверхности α=11° и средней толщине стенки технологического кольца не менее 180 мм выталкивание из него осаженной заготовки происходит без «залипания». То есть силы тяжести указанного технологического кольца достаточно для отделения от него заготовки под действием нижнего толкателя, в том числе в условиях, когда смазка рабочей поверхности кольца не выполняется. При меньшей толщине стенки кольца его масса также будет меньше и может иметь место подъем осаженной заготовки вместе с технологическим кольцом. Силу тяжести кольца определили следующим образом

$$P_m = m \cdot g = 495 \cdot 10 = 4950 \text{ Н},$$

где m – масса кольца, g – ускорение свободного падения.

Приравняем проекцию силы тяжести кольца на его рабочую поверхность к силе трения заготовки, действующей на рассматриваемой контактной поверхности:

$$P_m \cdot cos(\alpha) = \tau \cdot F_k,$$

где τ – напряжение контактного трения, F_k – площадь контакта боковой поверхности заготовки с кольцом (определена равной ~0,127 м^2).

По аналогии с законом трения Зибеля зависимость для τ представим в следующем виде:

$$\tau = f \cdot \sigma,$$

где f – показатель сил контактного трения, σ – напряжение течения металла заготовки.

Следовательно,

$$f = m \cdot g \cdot cos(\alpha) / \sigma \cdot F_k.$$

Принимая σ=55 МН/м^2 (для стали колес марки 2), значение f получили равным $7 \cdot 10^{-4}$.

Воспользуемся предложенным выше подходом и полученной оценкой для показателя f применительно к процессу осадки заготовки в верхнем плавающем калибровочном кольце пресса силой 20 МН. Приняв среднее значение диаметра осаженной заготовки по контактной поверхности равным 760 мм (F_k=0,119 м^2), а также α=13°, получили расчетное значение вертикальной силы, необходимой для выталкивания осаженной заготовки из верхнего калибровочного кольца, равное 4,5 кН (450 кгс). На практике масса исходных заготовок, как правило, не меньше 450 кг. Поэтому при подъеме траверсы, осаженные в верхнем калибровочном кольце заготовки, будут выпадать из него под действием собственной силы тяжести.

Предложенная конструкция рабочих органов пресса силой 20 МН (рис. 3) включает верхнюю опорную плиту пресса 1 (вместо используемой ранее гладкой обжимной плиты), в которой предусмотрено наличие фланцевого элемента с отверстиями для крепления гибких связей (например, цепей), на которых будет подвешено калибровочное кольцо 4. Также предусмотрено наличие ограничительного кольца 3, которое позволит обеспечить величину $L=const$ (см. рис. 3), что, в свою очередь, гарантирует сохранение в процессе рабочего хода-осадки технологического зазора h (см. рис. 3). В процессе осадки заготовки этот зазор будет образован между верхней обжимной плитой и калибровочным кольцом (см. рис. 3а), так как верхняя обжимная плита 2 практически сразу будет прижата заготовкой к верхней опорной плите 1.

Возможность перемещения подвешенного калибровочного кольца под действием обжимаемого металла обеспечит его равномерное заполнение и, соответственно, равномерный отпечаток кольца на боковой поверхности заготовки.

После осадки заготовки в калибровочном кольце траверса пресса поднимается. Заготовка

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

под действием собственной силы тяжести, а также силы тяжести верхней обжимной плиты гарантированно выталкивается из калибровочного кольца. При этом технологический зазор h образуется уже между верхней обжимной плитой и верхней опорной плитой (см. рис. 3б).

Технологический зазор h не должен превышать 5-9 мм. При этом будет обеспечено гарантированное выталкивание заготовки верхней обжимной плитой, так как образующийся зазор между боковой поверхностью заготовки и калибровочным кольцом составляет ~2 мм (см. рис. 3б).

Перед началом процесса деформирования заготовок на прессе 20 МН целесообразно на торцевые поверхности ограничительного кольца наносить смазку для облегчения процесса его скольжения по поверхностям калибровочного кольца и верхней опорной плиты в местах их соприкосновения.

Следует отметить, что предлагаемая конструкция рабочих органов осадочного пресса силой 20 МН позволяет не только осуществлять выталкивание осаженной заготовки из верхнего

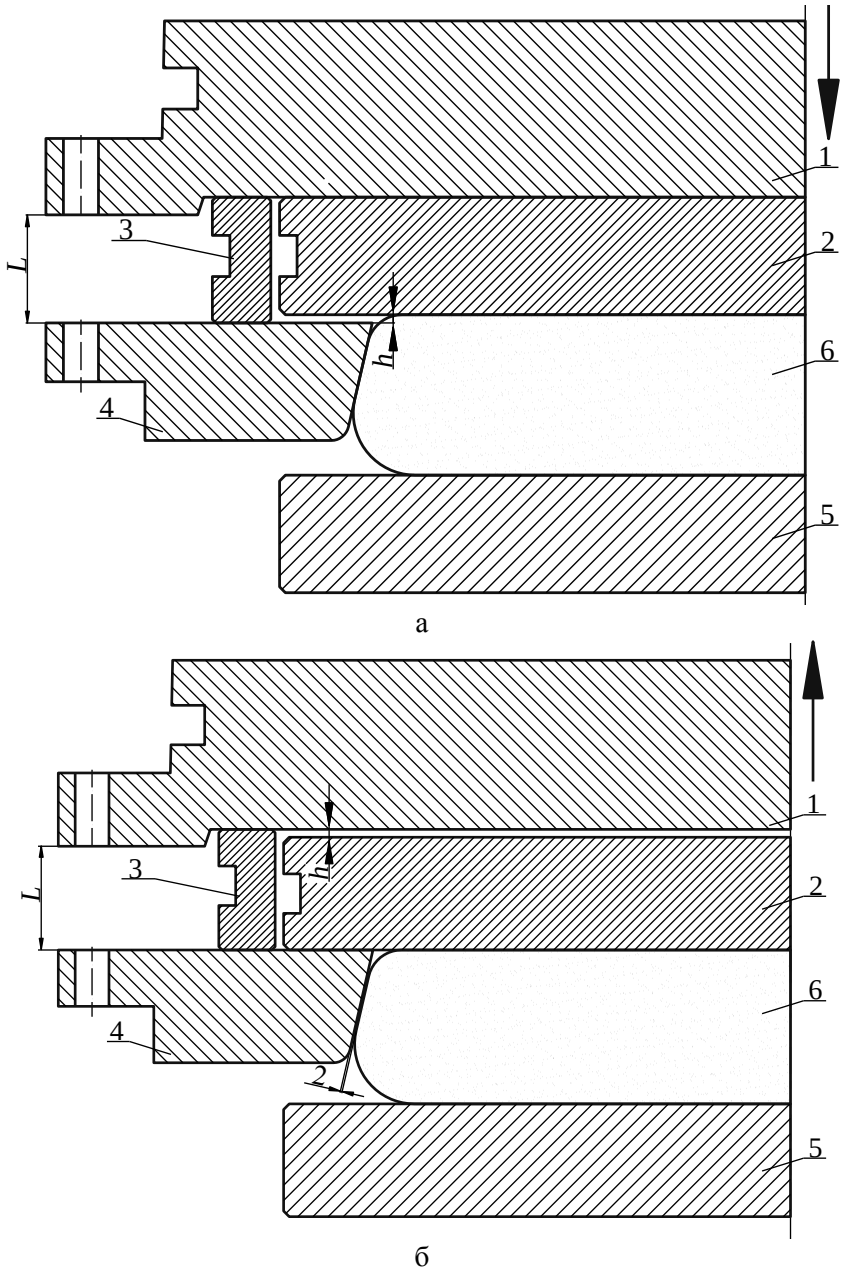


Рис. 3. Усовершенствованная конструкция рабочих органов пресса 20 МН: *а* – последний момент осадки заготовки; *б* – стадия выталкивания заготовки из кольца; *1* – плита верхняя опорная; *2* – плита верхняя обжимная; *3* – кольцо ограничительное; *4* – кольцо калибровочное; *5* – плита нижняя обжимная; *6* – заготовка после осадки в кольце; L – расстояние между верхней опорной плитой и калибровочным кольцом (длина гибкой связи); h – технологический зазор между верхней обжимной плитой и калибровочным кольцом (верхней опорной плитой)

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

плавающего калибровочного кольца, но и увеличить срок службы верхней обжимной плиты как минимум в два раза за счет возможности ее кантовки и, соответственно, замены выработанной нижней поверхности плиты на невыработанную верхнюю (см. рис. 3). Также возможна переточка выработанной поверхности плиты не только с нижней, но и с ее верхней стороны. Рекомендуемая высота верхней обжимной плиты составляет 100-110 мм, а ее масса ~ 500 кг. При этом также будет иметь место снижение цикла на прессе силой 20 МН за счет того, что расстояние, которое проходит верхняя траверса до начала рабочего хода-осадки, уменьшится на 100-110 мм.

Выводы

Применительно к прессопрокатным линиям по производству железнодорожных колес, в состав которых включены три пресса перед колесопрокатным станом, выполнено совершенствование технологических схем и конструкций рабочих органов прессов для осадки, разгонки и штамповки колесных заготовок, обеспечивающее повышение точности и стабильности размеров заготовок по переходам, рациональную силовую загрузку прессов, уменьшение времени на их настройку, снижение влияния точности настройки на геометрические параметры штампуемых колесных заготовок.

Усовершенствована конструкция рабочих органов пресса силой 20 МН, что обеспечивает рациональную высотную деформацию исходных заготовок (63-65 %) в верхнем плавающем калибровочном кольце с последующим их выталкиванием из него. Установлены рациональные величины диаметра калибровочного кольца (Ø735-742 мм) и угла его рабочей поверхности (α=13º), обеспечивающие устранение овальности, получение равномерного отпечатка кольца на заготовке при силе осадки близкой к допустимой и отсутствие «залипания» заготовки в кольце. Способ крепления верхней обжимной плиты пресса позволяет обеспечить гарантированное выталкивание осаженной заготовки из калибровочного кольца и увеличить срок ее службы как минимум в два раза за счет возможности ее кантовки и, соответственно, замены выработанной нижней поверхности плиты на невыработанную верхнюю.

Усовершенствована конструкция рабочих органов заготовочного пресса силой 50 МН, что обеспечивает: повышение стойкости головки нижнего толкателя; уменьшение времени на перевалку за счет использования нижнего накладного штампа; сокращение расходов металла на изготовление технологических колец за счет возможности их замены центрирующими кольцами, стойкость которых выше, а металлоемкость – ниже. Установлены рациональные диапазоны изменения угла наклона периферийной части рабочей поверхности нижнего штампа к горизонтали, на основе которых предложены различные варианты центровки заготовки в зависимости от технического состояния формовочного пресса.

Список литературы

1. Комплексный технологический процесс производства колес в условиях нового колесопрокатного цеха / Ф.Е. Розенталь, И.Г. Узлов, А.М. Токмаков и др. // Производство железнодорожных рельсов и колес: Темат. отрасл. сб. – Харьков: УкрНИИМЕТ, 1973. – С. 104-106.
2. Башилов, Г.Н. Производство цельнокатаных железнодорожных колес / Г.Н. Башилов, В.П. Васильковский, Р.Я. Каневский // Пути оптимизации параметров машин: Сб. статей. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1984. – С. 39-52.
3. Тубольцев, Ю.Г. Тенденции развития колесопрокатного производства на ОАО НТЗ // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2002. – № 8-9. – С. 483-487.
4. Копперс, У. Производство железнодорожных колес на высоком техническом уровне / У. Копперс, М. Кунц, М. Линденблатт // Черные металлы. – 2006. – № 3. – С. 75-79.
5. Снитко, С.А. Автоматизированное проектирование колес, калибровок, инструмента деформации и процессов в колесопрокатном производстве / С.А. Снитко, А.В. Яковченко, Н.И. Ивлева. – Донецк: Донецкий нац. техн. ун-т, 2017. – 342 с.
6. Совмещение операций осадки и разгонки на прессе усилием 49 МН с использованием заготовок из слитков, отлитых в цилиндрические изложницы с обточенной поверхностью / А.М. Волков, В.А. Тарасова, А.А. Яндимиров и др. // Современные технологии производства транспортного металла: материалы конференции «Трансмет-2007», Екатеринбург, 4-7 декабря 2007. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. – С. 245-248.
7. Производство железнодорожных колес / Г.А. Бибик, А.М. Иоффе, А.В. Праздников и др. – М.: Металлургия, 1982. – 232 с.
8. Пат. 2 404 877 Российская Федерация, МПК8 B21K 1/28, B21H 1/04. Способ изготовления цельнокатаных железнодорожных колес / Р.А. Голышков, В.А. Крошкин, А.Н. Сорокин и др. – № 2007128170/02; заявл. 24.07.2007;

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

опубл. 27.11.2010, бюл. № 33.
9. Яковченко, А.В. Проектирование профилей и калибровок железнодорожных колес / А.В. Яковченко, Н.И. Ивлева, Р.А. Голышков. – Донецк: Донецкий нац. техн. ун-т, 2008. – 491 с.

S.A. Snitko /Cand.Sci.(Eng.)/, A.V.Yakovchenko /Dr. Sci (Eng.)/,A.L. Sotnikov /Dr. Sci (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)

IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY AND EQUIPMENT IN WHEEL-ROLLING MILLS

Background. *Almost all of the major manufacturers of stamped-rolled railway wheels have continuously cast original workpieces of sufficiently constant size. This provides the possibility of improving the conventional ways of deformation of metals and improving the technical and economic indicators of production of wheels on rolling lines, which include three presses located in front of the wheel-rolling mill, due to reducing the machining allowances of the wheels, improving the accuracy and dimensional stability of workpieces and also improving performance by eliminating production bottlenecks.*

Materials and/or methods. *The objective of the work performed in relation to the press-rolling lines for railway wheels production, which include three presses located in front of the wheel-rolling mill, is the improvement of technological schemes and constructions of the working bodies of presses for upsetting, spread and stamping of wheel workpieces, providing: rational download of power presses, reducing time for setting them up, reducing the influence of the precision settings on the geometric parameters of the stamping of wheel workpieces.*

Results. *The design improved of the working bodies of the pressing force 20 MN, which provides the upsetting of the initial workpiece at the top floating calibration ring with the subsequent its ejection from it. The rational values determined for the diameter of the calibration ring (Ø735-742 mm) and the angle of its working surface (α=13º), providing the elimination of ovality, obtaining a uniform imprint of the ring on the workpiece with the power of upsetting close to the allowable and the lack of workpiece "sticking" in the ring. The design improved of the working bodies of the pressing force 50 MN, which ensures: increasing the durability of the head of the lower pusher; reducing production time by utilizing the lower surface of the die; reducing metal consumption for manufacturing the technology rings due to the possibility of their replacement by centering rings with higher resistance and lower metal consumption.*

Conclusion. *In relation to the press-rolling lines for railway wheels production, which include three presses located in front of the wheel-rolling mill, made the improvement of the technological schemes and constructions of the working bodies of presses for upsetting, spreading and stamping of wheel workpieces, providing: a rational power load of presses, reducing time for upsetting them, reducing the influence of the precision upsetting on the geometric parameters of wheel workpieces stamping.*

Keywords: *technological schemes of stamping, wheel workpieces, the design of working bodies of presses, centering of workpieces, press upsetting.*

Сведения об авторах

С.А. Снитко
SPIN-код: 8463-3786
Author ID: 844696
Телефон: +380 (50) 473-14-52
Эл. почта: snitko_sa@mail.ru

А.Л. Сотников
SPIN-код: 5203-7480
Author ID: 623331
Телефон: +380 (71) 301-98-70
Эл. почта: 0713019870@mail.ru

А.В. Яковченко
SPIN-код: 1314-1795
Author ID: 850425
Телефон: +380 (50) 995-10-47
Эл. почта: mond1991@mail.ru

Статья поступила 28.12.2017 г.
© С.А. Снитко, А.В. Яковченко, А.Л. Сотников, 2017
Рецензент д.т.н., проф. С.П. Еронько

УДК 622.223.83

Н.Г. Афендиков /к.т.н./, А.В. Шендрик
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ГИДРОПРИВОДОВ ПРОХОДЧЕСКИХ КОМБАЙНОВ ЗА СЧЕТ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ГИДРОЦИЛИНДРОВ

В работе приведены данные анализа на загрязнение проб рабочей жидкости гидросистем проходческих комбайнов. Представлены результаты замеров износа внутренних поверхностей гидроприводов перемещения в вертикальной, горизонтальной плоскостях и домкратов подъема питателя. Даны результаты опытной электромеханической обработки внутренних поверхностей домкратов на заводе «Спецреммаш».

Ключевые слова: *загрязнение рабочей жидкости, износ внутренних поверхностей гидродомкратов, электромеханическая обработка.*

Постановка проблемы

В проходческих комбайнах избирательного действия со стреловидными исполнительными органами перемещение разрушающих коронок в плоскости забоя происходит за счет линейных гидроприводов, включающих большое число гидродомкратов. На заводах-изготовителях гидродомкраты, как правило, изготавливаются из нормализованной стали 30ХГСА, и твердость их рабочих поверхностей не превышает значений 230…270 НВ. Ни на заводах-изготовителях, ни на ремонтных предприятиях при восстановлении гидродомкратов внутренние поверхности не термообратываются и не упрочняются. Известно [1], что твердость поверхностей, при прочих равных условиях, влияет на стойкость материалов при абразивном изнашивании.

Следует отметить, что гидродомкраты перемещения исполнительных органов в вертикальной и горизонтальной плоскостях совершают до 300 движений за один цикл заходки, при этом количество изменений движений за сутки может достигать до 1500-2000. Скорости перемещения исполнительных органов довольно высокие и достигают 0,15 м/с при значительных (до 10^2 кН) суммарных нагрузках на исполнительном органе в направлении его движения.

Большие нагрузки, высокие скорости движения и попавшие в зазоры пар трения гидроприводов абразивные частицы обусловливают абразивный износ внутренних поверхностей гидроцилиндров, имеющих небольшие значения твердости. Абразивные частицы обычно попадают в рабочие полости машины из воздуха. Из абразивных частиц, перемещаемых воздухом, наибольшее изнашивающее действие оказывают частицы колчедана и других крепких пород и включений, имеющие высокую твердость. Их размер может составлять 30 мкм и более, и они могут находиться во взвешенном состоянии в воздухе. Воздушные фильтры (сапуны) маслобаков проходческих комбайнов задерживают крупные частицы абразивной пыли, а мелкие попадают в емкость рабочей жидкости, а затем абразивные частицы вместе с рабочей жидкостью поступают в пары трения. Кроме этого, абразивные частицы могут поступать из литейных полостей узлов и деталей комбайнов, а также появляются в рабочей жидкости как продукты разрушения металлических поверхностей механизмов гидравлической системы комбайна. Все эти частицы участвуют в абразивном износе. Абразивный износ заключается в разрушении внутренних поверхностей гидроцилиндров твердыми зернами абразива при микрорезании трущихся поверхностей и при их пластической деформации. А также твердые зерна могут впрессовываться в более мягкую поверхность пары трения, скользить или перекатываться вдоль внутренней поверхности цилиндра, пластически деформируя и изнашивая ее. Кроме абразивного износа, в гидравлических системах проходческих комбайнов присутствует также и гидроабразивный износ. При гидроабразивном износе носителями абразивных частиц являются рабочие жидкости гидросистемы. Поток рабочей жидкости при движении с большой скоростью ударно воздействует абразивными частицами на элементы гидросистемы проходческого комбайна и при этом изнашивает их. В связи с очень большой запыленностью воздуха в проходческих забоях абразивный и гидроабразивный износы являются доминирующими для проходческих машин и оборудования. Поэтому для повышения износостойкости гидродомкратов необходимо повышать твердость их внутренних поверхностей.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Анализ последних исследований и публикаций

Вопросам упрочнения и восстановления изношенных поверхностей деталей посвящено большое число научно-исследовательских работ. Так, например, в работе [2] рассмотрены вопросы восстановления деталей за счет алмазной обработки материалов. В работах [3,4] восстановление рабочих поверхностей деталей предлагается за счет их лазерной обработки. В [5-9] предложены прогрессивные импульсные технологии, способ электроконтактной и комбинированной фрикционно-электрической обработки стальных поверхностей материалов, абразивно-изношенных сопрягаемых поверхностей деталей. Одним из наиболее перспективных, на наш взгляд, способов упрочнения и восстановления внутренних поверхностей гидроцилиндров гидроприводов является технология электромеханической обработки [9], разработанная в Ульяновском сельскохозяйственном институте. Сущность этой обработки состоит в том, что через деформирующий элемент, например, накатной ролик, пропускают ток большой силы и низкого напряжения, в результате чего в зоне контакта ролика с поверхностью детали образуется локальный разогрев до температуры, соответствующей фазовому переходу в металлах. За счет высоких скоростей нагревания и охлаждения контактной зоны, в условиях приложения деформирующего усилия, в поверхностном слое образуются высокотвердые и износостойкие поверхности, снижение шероховатости поверхности и появление остаточных напряжений сжатия, что повышает основные эксплуатационные свойства деталей машин. В работе [10] приведены результаты научно-исследовательских работ по дальнейшему усовершенствованию способа электромеханической обработки материалов.

Цель (задачи) исследования

Целью данного исследования является проведение экспериментальных работ по повышению твердости и износостойкости внутренних поверхностей гидроцилидров перемещения исполнительного органа в вертикальной и горизонтальной плоскости КСП-32.16.00.000, КСП-32.19.04.000 и гидродомкратов подъема питателя КСП-32.31.00.000 за счет электромеханической обработки при восстановлении на ремонтном предприятии. В задачи исследований входит проведение замеров износа внутренних поверхностей гидродомкратов, взятие и анализ проб на загрязнение рабочей жидкости гидросистем проходческих комбайнов КСП-32, эксплуатируемых на различных шахтах (в различных горно-геологических условиях). При анализе рабочей жидкости устанавливаются размер, литографичекий состав и твердость породных включений.

Основной материал исследования

В табл. 1 приведены данные состояния рабочей жидкости гидросистемы проходческих комбайнов. Пробы рабочей жидкости (масло ИГП 72) взяты в подземных условиях шахт. Анализы проб рабочей жидкости выполнены в лаборатории Института физики горных процессов.

Результаты анализов качества рабочей жидкости, проведенные на заводе «Спецреммаш», показали, что рабочие жидкости содержат до 1,5 % породных, металлических и окалинных примесей. Максимальные размеры включений достигают 75 мкм. Установлено, что породные включения содержат частицы колчедана, пирита, кварца, кремния, песчаника, песчанистого сланца и угля. Некоторые частицы являются абразивами очень высокой твердости, значительно (в несколько раз) превышающей твердость внутренней поверхности цилиндров, что приводит к интенсивному повреждению и износу их внутренних поверхностей. Изношенные внутренние поверхности цилиндров, в свою очередь, за счет возникшей шероховатости приводят к разрушению направляющих втулок, чистителей, колец и манжет. Это обусловливает увеличение зазоров между цилиндрами и поршнями домкратов, повышение утечек и приводит к выходу их из эксплуатации. На рис. 1 приведен образец изношенной манжеты.

Из сказанного следует, что проблема обеспечения надежности работы гидрооборудования проходческих комбайнов, в т.ч. внутренних рабочих поверхностей цилиндров перемещения исполнительных органов, является важной задачей.

В табл. 2 приведены результаты дефектирования гидроприводов перемещения исполнительного органа в вертикальной плоскости комбайна (КСП-32.16.00.000), гидроприводов перемещения исполнительного органа в горизонтальной плоскости (КСП-32.19.04.000) и гидроприводов подъема питателя (КСП-32.31.00.000).

Замер шероховатости износа производился при помощи профилометра ПЧ-2, приведенного на рис. 2.

Из анализа данных, приведенных в табл. 2, следует, что износ внутренних поверхностей цилиндров по длине составил от 280 мм до 630 мм, износ диаметров значительный и достигает 0,7 мм – для гидродомкратов КСП-32.31.00.000, 1,2 мм – для гидродомкратов КСП-32.19.04.000 и 1,6 мм – для гидродомкратов КСП-32.31.00.000.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Табл. 1. Результаты анализа проб рабочей жидкости гидросистемы проходческих комбайнов

№ п/п	Наименование предприятия	Тип комбайна	Содержание породных включений (%)	Содержание металлических включений (%)
1	Шахта «Ждановская»	КСП-32	1,4	0,2
2	Шахта им. Засядько	КСП-32	0,9	0,1
3	Шахта «Россия»	КСП-32	1,2	0

Табл. 2. Результаты дефектирования гидродомкратов комбайна типа КСП-32

Наименование предприятия	Заводской номер чертежа домкрата	Длинаизношенной части домкрата, мм	Максимальный износ диаметра, мм	Максимальная глубина рисок, мкм
Шахта «Ждановская»	КСП-32.16.00.000	550	0,4	120
	КСП-32.19.04.000	630	0,7	100
	КСП-32.31.00.000	370	1,2	150
Шахта им. Засядько	КСП-32.16.00.000	650	1,1	170
	КСП-32.19.04.000	430	0,7	130
	КСП-32.31.00.000	330	1,6	100
Шахта «Россия»	КСП-32.16.00.000	540	0,5	100
	КСП-32.19.04.000	460	1,2	150
	КСП-32.31.00.000	280	0,7	110

Максимальная глубина рисок изменяется в пределах 100…170 мкм для гидроприводов КСП-32.16.00.000. Максимальная глубина рисок 100…150 мкм – для гидроприводов КСП-32. 19.04.000. Максимальная глубина рисок 100…110 мкм – для гидродомкратов КСП-32.31.00. 000.

Для восстановления, упрочнения и повышения твердости внутренних поверхностей гидродомкратов проходческих комбайнов на заводе «Спецреммаш» проводился эксперимент по электромеханической обработке поверхностей на установке, приведенной на рис. 3.

Установка базируется на токарно-винторезном станке типа 1М63. В задней бабке устанавливается раскатная головка. Последовательность обработки внутренней поверхности цилиндра состоит в следующем: гидроцилиндр устанавливается и закрепляется в патроне передней бабки токарного станка. Соосность гидроцилиндра и раскатной головки при обработке обеспечивается неподвижным роликовым люнетом типа 1М63Б.66.000.

Электромеханическая обработка (упрочнение) [9,10] основана на использовании термического и силового воздействия на внутренние поверхности гидроцилиндров. В результате значительно изменяются физико-механические свойства поверхностного слоя, повышается микротвердость и износостойкость. Сущность обработки состоит в том, что через деформирующий элемент, например раскатный ролик, пропускают ток большой силы (100…1200 ампер) и низкого напряжения (1...8 вольт). В результате этого в зоне контакта ролика с поверхностью детали, из-за высокого электрического сопротивления зоны контакта, происходит сильный нагрев контактирующих неровностей (гребешков) обрабатываемой поверхности, и под силовым воздействием инструмента они деформируются и сглаживаются, а поверхностный слой упрочняется (закаливается) за счет быстрого отвода тепла в основную массу материала и скоростного охлаждения от эмульсии. При этом разогрев до температур фазовых превращений (t=850-950 °С) приводит к упрочнению поверхностного слоя металла.

Электромеханическое упрочнение характеризуется следующими особенностями:

– термическое и деформационное действие на плоскость материала исполняется одновременно;

– нагрев поверхностного слоя проистекает от 2-х источников: внешнего источника из-за теплоты трения и деструкции при накатке; внутреннего источника из-за термической энергии, возникающей при прохождении электрического тока;

– длительность нагрева и паузы зависит от размера поверхности контакта и быстроты обкатки, является довольно кратковременной и измеряется сотыми, а иногда тысячными долями секунды;

– большая скорость остывания определяется интенсивностью отвода тепловой энергии из тонкого поверхностного слоя в массив холодной детали и подачей охлаждающей жидкости;

– внешний слой детали может подвергаться многократному термическому действию, при нескольких проходах раскатки.

Большими достоинствами этого способа являются отсутствие нагрева и термообработки основной массы металла детали. Упрочнению

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org



Рис. 1. Образец изношенной манжеты

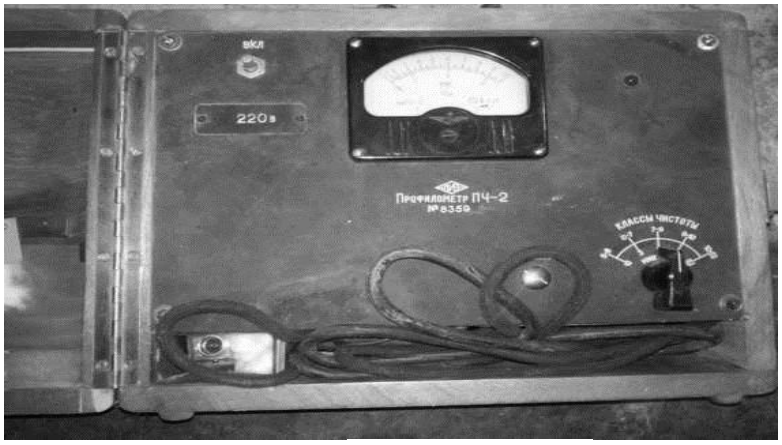


Рис.2. Профилометр ПЧ-2

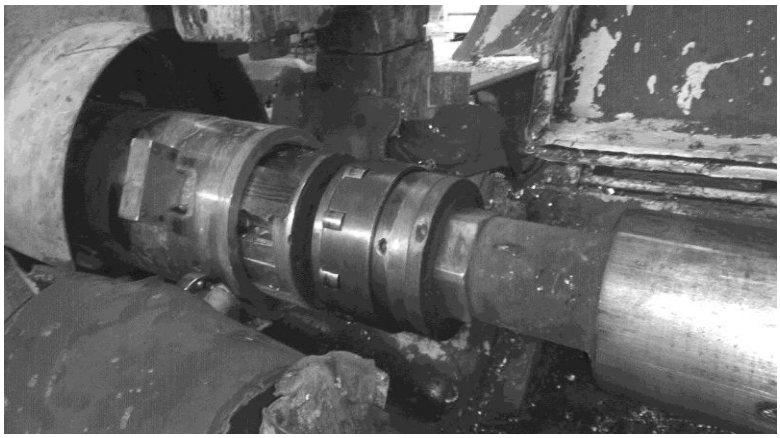


Рис. 3.Экспериментальная установка для электромеханической обработки внутренней поверхности цилиндров



Рис. 4. Раскатная головка для электромеханического упрочнения внутренней поверхности цилиндров

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Табл. 3. Результаты замера твердости, микротвердости и шероховатости внутренних поверхностей цилиндров

№ п/п	Номер чертежа цилиндра	Твердость по Роквеллу, HRC	Микротвердость по Виккерсу, HV	Шероховатость, Ra, мкм
1	КСП-32. 16.00.000	55,3	645	0,1…0,32
2	КСП-32. 19.04.000	58,6	730	0,1…0,32
3	КСП-32. 31.00.000	61,5	816	0,1…0,32

подвергается только поверхностный слой, при этом основная масса металла остается «мягкой» и вязкой, что повышает безопасность эксплуатации при динамических режимах нагружения деталей.

В качестве источника технологического тока использовался однофазный трансформатор. Раскатная головка, представленная на рис. 4, подключается к вторичной обмотке трансформатора, ее корпус изолированно установлен в задней бабке токарного станка. Ролики диаметром 20 мм раскатной головки выполнены из материала ШХ15.

При экспериментальных исследованиях испытывались образцы гидроцилиндров с различной степенью изношенности. Цилиндры с низкой изношенностью, до 0,25 мм, подвергались электромеханической обработке без предварительной расточки. Гидроцилиндры с большей степенью изношенности растачивались до ремонтных размеров +0,5 (первый ремонтный вариант размера внутреннего диаметра цилиндра) и +1,0 мм (второй ремонтный вариант размера диаметра). Внутренние поверхности гидроцилиндров после электромеханической обработки исследовались на твердость по Роквеллу (HRC), микротвердость – по Виккесу (HV), а также определялась шероховатость поверхности Ra.

В табл. 3 приведены результаты замеров твердости, микротвердости и шероховатости внутренних поверхностей цилиндров различного назначения.

Из данных, приведенных в табл. 3, следует, что для гидроцилиндров КСП-32. 16.00.000, КСП-32.19.04.000 и КСП-32.31.00.000 твердость по Роквеллу изменяется в пределах 55…62 HRC, микротвердость по Виккерсу изменяется в пределах 645…816 HV, а шероховатость изменяется в пределах Ra 0,1…0,32 мкм. Значения этих данных свидетельствуют о высоких показателях технических параметров с упрочненными внутренними поверхностями гидроприводов, а метод электромеханической их обработки и упрочнения является эффективным при ремонтном восстановлении и при изготовлении новых гидроцилиндров.

Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что для повышения надежности гидродомкратов перемещения исполнительных органов избирательного действия в плоскости пласта целесообразно использовать метод электромеханического упрочнения внутренней поверхности гидроцилиндров, изготовленных из стали 30ХГСА, для получения высокой поверхностной твердости – до 55…62 HRC, микротвердости 645…816 HV и наименьшей шероховатости поверхности Ra=0,01…0,32 мкм.

Список литературы

1. Ржевская, С.В. Материаловедение: Учебник, 4-е изд. – М.: Логос, 2004. – 413 с.
2. Абразивная и алмазная обработка материалов: справочник. Под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391с.
3. Ким, В.А. Лазерное упрочнение инструментальной стали SKD61 / В.А. Ким, А.В. Усатый, Ш.А. Каримов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015. – № 1 (121). – С.15-21.
4. Жиляев, В. А. Повышение эксплуатационных свойств деталей из коррозионно-стойких упрочняемых сталей лазерной обработкой: автореферат дис. …канд. техн. наук: 05.03.01 / Жиляев Владимир Анатольевич. – Волгоград, 2005. – 25 с.
5. Баранов, М.И. Прогрессивные импульсные технологии обработки материалов: история, физические основы и технические возможности / М.И. Баранов // Електротехніка і Електромеханіка. – 2009. – № 1. – С. 42-52.
6. Козлов, В.Г. Новый способ электроконтактной обработки // Современные проблемы науки и образования: [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.science-education.ru/ru/ article/ view?id=21903
7. Машков, Ю.К. Комбинированное фрикционно-электрическое модифицирование стальных поверхностей трения / Ю.К. Машков [и др.] // Трение и износ. – 2006. – Т. 27, №. 3. – С. 89-92.
8. Experimental analysis of ductile damage of metals under tensile stresses / M.A. Zapara [et

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

al.] // IV международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов», Москва, 25-28 октября 2011 г. / Сборник материалов. – М: ИМЕТ РАН, 2011. – С. 62-64.
9. Аскинази, Б. М. Упрочнение и восстановления деталей электромеханической обработкой. – Л.: Машиностроение,. 1977. – 183 с.
10. Электромеханическая обработка: технологические и физические основы, свойства, реализация / В.П. Багмутов [и др.]. – Новосибирск: Наука, 2003. – 318 с.

N.G. Afendikov /Cand.Sci. (Eng.)/, A.V. Shendrik
Donetsk National Technical University (Donetsk)

IMPROVING THE RELIABILITY OF A CUTTER-LOADER HYDRAULIC DRIVE DUE TO ELECTROMECHANICAL MACHINING OF INTERNAL SURFACES OF HYDRAULIC CYLINDERS

Background. *In the cutter-loaders of selective action, there is a large number of hydraulic jacks that operate with significant loads, high speeds and long travel time (the operation time of the hydraulic jacks coincide with the operation time of cutter-loaders). Cutter-loaders operate in dusty environments of a breakage face. Abrasive dust and the products of wear of the hydraulic components fall into the working fluid and the friction pairs. Thus there is intensive abrasive and hydro abrasive wear of working surfaces of the cylinders. In this regard, improving the reliability of the jacks is an important technical problem.*

Materials and/or methods. *To determine wear on internal surfaces of the jacks and contamination of the working fluid measurements and samples were taken for oil analysis in mines with varying conditions. Deterioration of internal surfaces of hydraulic jacks along the length was 280...630 mm, diameter wear reaches 0.7...1.6 mm for hydraulic jacks: KSP-32.19.04.000; KSP-32.31.00.000; KSP-32.16.00.000. The maximum depth of the grooves varied in the range of 100...170 mkm for the hydraulic jacks KSP-32.16.00.000. The maximum depth of the grooves was 100...150 mkm for the hydraulic jacks KSP-32.19.04.000. The maximum depth of the grooves was 100...110 mkm for the hydraulic jacks KSP-32.31.00.000. This secondary roughness leads to a sharp deterioration of rubber and plastic parts that affects the durability of the jacks.*

Results. *To restore and increase the hardness of internal surfaces of hydraulic jacks for cutter-loaders the mechanical treatment of surfaces in a test rig of the plant "Spetsremmash" was carried out. The cylinders up to 0.25 mm wear subjected to electromechanical treatment without pre-boring. Hydrocylinders with greater deterioration bored to the size +0.5 (first repair size) and +1.0 mm (second repair size). The surface of hydro-cylinders after the electromechanical treatment investigated on hardness, microhardness, and roughness. For cylinders KSP-32.16.00.000, for cylinders KSP-32.19.04.000, and for hydro-cylinders KSP-32.31.00.000 Rockwell hardness varies within 55...62 HRC, Vickers microhardness varies within 645...816 HV, and the roughness Ra varies within 0.1... 0.32 mkm.*

Conclusion. *The results of the studies testify to the high-performance parameters of hydraulic cylinders with hardened surfaces, and the method of electromechanical treatment and hardening is effective for the repair restoration and in the manufacture of new hydraulic cylinders.*

Keywords: *contamination of the working fluid, wear on the internal surfaces of hydraulic jacks, electromechanical treatment.*

Сведения об авторах

Н.Г. Афендиков
Телефон: +380 (71) 376-13-46
Эл. почта: an77tn@gmail.com

А.В. Шендрик
Телефон: +380 (71) 311-09-88
Эл. почта: gormash@i.ua

Статья поступила 26.12.2017 г.
© Н.Г. Афендиков, А.В. Шендрик, 2017
Рецензент д.т.н., проф. В.П. Кондрахин

УДК 622.232.72.063

О.Е. Шабаев /д.т.н./, В.Г. Нечепаев /д.т.н./, П.П. Зинченко
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)
А.В. Мезников, А.В. Коваленко
ГУ «Донецкий научно-исследовательский проектно-конструкторский институт комплексной механизации шахт» (Донецк)

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УДЕЛЬНЫХ ЭНЕРГОЗАТРАТ РАЗРУШЕНИЯ И ПОГРУЗКИ ОЧИСТНЫХ КОМБАЙНОВ ДЛЯ ТОНКИХ ПЛАСТОВ В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Предложена методика экспериментального определения энергетических показателей работы очистных комбайнов для тонких пологих пластов с индивидуальными приводами шнековых исполнительных органов. Установлена зависимость между мощностью, удельными энергозатратами погрузки и скоростью перемещения очистного комбайна. Показано, что зависимость мощности погрузки от скорости перемещения комбайна имеет существенно нелинейный характер, что необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации очистных комбайнов для тонких пластов.

Ключевые слова: *очистной комбайн, шнековый исполнительный орган, производительность, скорость перемещения комбайна, удельные энергозатраты.*

Постановка проблемы

Основным источником энергетических ресурсов в Донецком регионе является уголь, запасы которого оцениваются порядка 6,84 миллиарда тонн (96 % от общеукраинских запасов). При этом большинство этих запасов (83,2 %) находится в пластах мощностью 0,55-1,2 м [1].

При добыче угля в таких пластах применяются в основном узкозахватные очистные комбайны в составе механизированных комплексов [2]. Процесс добычи угля очистными комбайнами из тонких пологих пластов существенно затрудняется низкой погрузочной способностью и высокими удельными энергозатратами погрузки [2-3], которые ограничивают скорость подачи (до 3-5 м/мин) и, как следствие, обусловливают низкую производительность комбайна. Интенсификация добычи угля в тонких пологих пластах требует повышения скорости перемещения очистных комбайнов до 14 м/мин [4], что обуславливает необходимость создания выемочной техники нового технического уровня.

Для повышения эффективности добычи угля на тонких пологих пластах необходимы детальный анализ режима работы каждого привода исполнительного органа раздельно и оценка энергетических параметров рабочих процессов очистных комбайнов в реальных условиях эксплуатации. Существует опыт регистрации прошедших событий проходческого комбайна [5], оснащенного стационарными блоками, фиксирующими значения токов приводных двигателей исполнительных механизмов машины. Следует также отметить, что проведение экспериментальных исследований энергетических параметров работы очистного комбайна в шахтных условиях вызывает ряд проблем, таких как встраивание регистрирующей аппаратуры в специально разработанную защитную оболочку, отдельно размещенную на корпусе комбайна, что значительно увеличивает габарит портала комбайна и усложняет, а иногда и исключает продвижение комбайна в действующей лаве; довольно трудоемкий процесс контроля хода записи данных; кроме того, все работы, связанные с установкой блока регистрации, настройкой аппаратуры, фиксированием режимов работы, хронометражем событий, изъятием и демонтажем оборудования, влекут за собой продолжительные простои действующего очистного забоя. Во избежание этих проблем в ходе проектирования современных очистных комбайнов необходимо их рассматривать как мехатронные объекты.

Дальнейшее использование массивов данных в практических целях (зафиксированных регистрирующими устройствами) требует синхронизации записей режимов и разработки соответствующих методик их оценки.

Анализ последних исследований и публикаций

Создание современных очистных комбайнов для тонких пологих пластов требует оценки фактических значений мощности разрушения и погрузки, а также соответствующих удельных энергозатрат. Определению энергетических по-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

казателей работы очистных комбайнов в реальных условиях эксплуатации посвящены труды многих ученых [2-4,6-11]. Общие задачи и принципы проектирования и конструирования горного оборудования нового технического уровня изложены в [9]. Вопросы, касающиеся проектирования узкозахватных комбайнов, работающих в условиях тонких пологих пластов, рассмотрены в [2,3,6-8]. В работах [4,10] изложены принципы проектирования механизмов перемещения очистных комбайнов. Методика обработки данных регистрирующих устройств, установленных на проходческой технике, предложена в работе [11]. При этом отсутствует методика обработки данных регистрирующих устройств, установленных на современных очистных комбайнах.

Таким образом, актуальной научно-практической задачей является создание методики оценки удельных энергозатрат разрушения и погрузки в реальных условиях эксплуатации современных очистных комбайнов.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является разработка методики определения удельных энергозатрат разрушения и погрузки в реальных условиях эксплуатации современных очистных комбайнов для тонких пологих пластов.

Основной материал исследования

Методика определения энергетических параметров работы очистного комбайна

Исходными данными для определения энергетических параметров работы очистного комбайна, согласно разработанной методике, являются значения тока двигателя, фиксируемые устройством регистрации прошедших событий. Одновременно регистрируются мощность вынимаемого пласта, скорость перемещения очистного комбайна, а также физико-механические свойства разрушаемого массива.

Поскольку современные очистные комбайны оснащаются, как правило, независимым приводом для каждого исполнительного органа (ИО), фактическое значение мощности на одном (i-том) исполнительном органе может быть определено из выражения:

$$P_i = P_{ном} \cdot \frac{I_{ср.i} - I_{хол.ход}}{I_{ном}} \cdot cos\varphi(I) \cdot \eta_{ред} \text{ [кВт]},$$

где $I_{ср.i}$ – среднее за период замера значение тока i-го двигателя исполнительно органа, А; $I_{хол.ход}$ – значение тока холостого хода электродвигателя (для каждого двигателя определяется по результатам экспериментальных данных), А; $I_{ном}$ – номинальный ток электродвигателя, А; $\eta_{ред}$ – КПД редуктора системы резания; $cos\varphi(I)$ – коэффициент мощности двигателя при полном значении тока; $P_{ном}$ – номинальная мощность электродвигателя, кВт.

С учетом того, что по условиям эксплуатации очистных комбайнов для тонких пологих пластов со шнековым исполнительным органом опережающий шнек разрушает пачку угля, прилегающую к почве пласта, и осуществляет погрузку отбитой массы, а отстающий шнек выполняет в основном функцию разрушения оставшейся пачки угля, значение мощности разрушения на опережающем ИО $P_{рез.опер.}$ может быть определено исходя из значений мощности на отстающем ИО $P_{отст}$:

$$P_{рез.опер.} = \frac{P_{отст.}}{k_{осл.} \cdot k_{\gamma.охв}} \text{ [кВт]},$$

где $k_{осл}$ – коэффициент ослабления угольного массива; $k_{\gamma.охв}$ – коэффициент охвата шнека забоем.

Тогда значение мощности погрузки на опережающем исполнительном органе $P_{погр.опер.}$ может быть найдено из выражения:

$$P_{погр.опер} = P_{опер.} - P_{рез.опер.} \text{ [кВт]}.$$

Установление значений удельных энергозатрат требует определения фактической производительности выемки за рассматриваемый период. Производительность опережающего $Q_{опер}$ и отстающего $Q_{отст}$ исполнительных органов можно определить из выражений:

$$Q_{опер} = D_{и.о.} \cdot B_З \cdot V_п \cdot \rho \text{ [т/мин]};$$

$$Q_{отст} = (H_{пл} - D_{и.о.}) \cdot B_З \cdot V_п \cdot \rho \text{ [т/мин]},$$

где $D_{и.о.}$ – диаметр исполнительного органа очистного комбайна, м; $B_З$ – ширина захвата исполнительного органа очистного комбайна, м; $H_{пл}$ – мощность разрушаемого пласта, м; $V_п$ – скорость подачи очистного комбайна, м/мин; ρ – плотность угля, т/м^3.

Тогда значения удельных энергозатрат на опережающем $W_{опер}$ и отстающем $W_{отст}$ шнеках:

$$W_{опер} = \frac{P_{ном} \cdot (I_{ср.i} - I_{хол.ход}) \cdot \eta_{ред} \cdot cos\varphi(I)}{60 \cdot I_{ном} \cdot D_{и.о.} \cdot B_З \cdot V_п \cdot \rho} \text{ [кВт ч/т]};$$

$$W_{отст} = \frac{P_{ном} \cdot (I_{ср.i} - I_{хол.ход}) \cdot \eta_{ред} \cdot cos\varphi(I)}{60 \cdot I_{ном} \cdot (H_{пл} - D_{и.о.}) \cdot B_З \cdot V_п \cdot \rho} \text{ [кВт ч/т]}.$$

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Исходя из отмеченных выше особенностей технологической схемы работы современных комбайнов для тонких пластов, удельные энергозатраты разрушения на отстающем шнеке $W_{разг}$ могут быть определены как:

$$W_{разр} = \frac{W_{отст}}{k_{осл}} \text{ [кВт ч/т]},$$

а удельные энергозатраты погрузки на опережающем шнеке $W_{погр}$:

$$W_{погр} = W_{опер} - W_{разр} = \frac{P_{погропер}}{Q_{опер} \cdot 60} \text{ [кВт ч/т]}.$$

Определение энергетических параметров работы очистного комбайна в условиях шахты «Красный Партизан»

Для апробации разработанной методики в качестве объекта исследования был принят очистной комбайн УКД400 – характерный представитель выемочных машин нового технического уровня для выемки угля из тонких пологих пластов (рис. 1), имеющий следующие технические характеристики:

– диаметр исполнительного органа 0,9 м;

– ширина захвата 0,7 м;

– номинальная мощность двигателя привода резания в режиме S1 200 кВт, (номинальный ток 129 А).

Экспериментальные исследования были проведены сотрудниками ГУ «Донецкий научно-исследовательский проектно-конструкторский институт комплексной механизации шахт» (Донгипроуглемаш) в условиях 77-й западной лавы пласта k_5^1 ОП «Шахта «Красный Партизан» ГП «Свердловантрацит». Угольный пласт k_5^1 «Должанский» мощностью $H_{пл}$=1,21 м сложного строения (уголь черный, блестящий, излом раковистый с зеркалами скольжения; прослойка мощностью h_2=0,09 м, сланец песчано-глинистый темно-серый, слоистость неясная; нижняя чистая угольная пачка мощностью h_1=0,81 м, уголь черный, блестящий, излом ступенчатый, крупнополосчатый). Крепость угля 1,5. Схема разрушения горного массива комбайном приведена на рис. 2.

В ходе проведения экспериментальных исследований проводилась регистрация средних действующих энергетических параметров работы каждого из электродвигателей привода резания очистного комбайна с использованием многоканального регистратор-анализатора качества энергии TOPAS 1020 с шагом 0,05 секунды, усредненной за 0,05 секунды. При этом забой условно делился на 3 участка, отличные по значению скорости перемещения очистного комбайна. Одновременно с этим фиксировалась длительность прохождения комбайном участка забоя, равного 1,5 м (расстояние между секциями крепи). Длительность замеров времени при прохождении участков составила 20, 17, 60 секунд. Скорость подачи комбайна на этих участках соответственно составила 4,5; 5,3; 3,75 м/мин.

В качестве примера на рис. 3 приведен фрагмент изменения значений токов двигателей поворотных блоков резания опережающего и отстающего шнеков при прохождении комбайном участка забоя (время прохождения участка 17 сек, скорость подачи комбайна 5,3 м/мин).

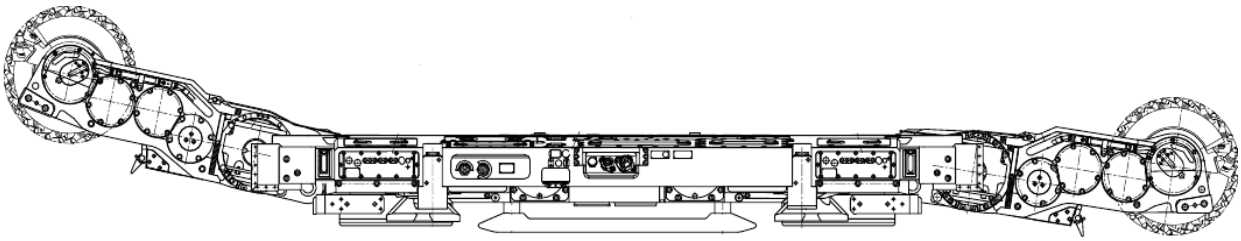


Рис. 1. Общий вид комбайна УКД400

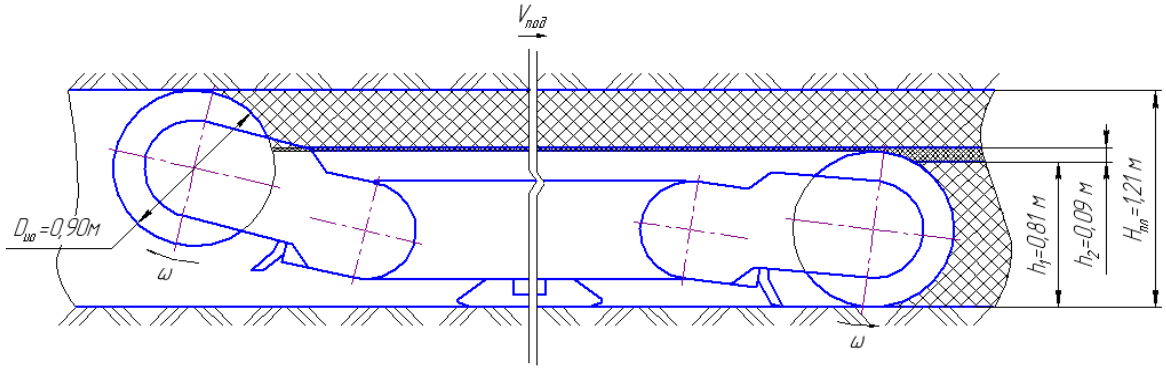


Рис. 2. Схема разрушения горного массива комбайном УКД400

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

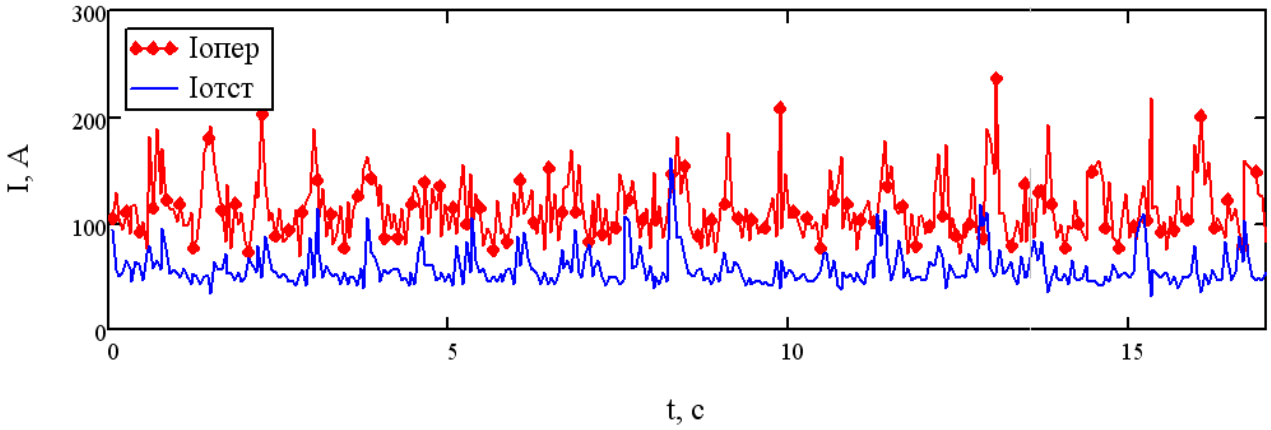


Рис. 3. Зафиксированные значения токов двигателей приводов резания очистного комбайна УКД400

Полученные результаты обработки значений токов двигателей приводов исполнительных органов по изложенной методике приведены в табл. 1.

На основе полученных экспериментальных данных составлены уравнения регрессии для определения удельных энергозатрат и мощности погрузки:

$$W_{пог}(V_n) = w_1 \cdot V^2{}_n - w_2 \cdot V_n + w_3 \ [\text{кВт ч/т}],$$

где w_1=0,0045, w_2=0,0275, w_3=0,1133 – коэффициенты уравнения регрессии.

$$P_{пог}(V_n) = p_1 \cdot V^2{}_n - p_2 \cdot V_n + p_3 \ [\text{кВт}],$$

где p_1=1,3831, p_2=5,2519, p_3=14,229 – коэффициенты уравнения регрессии.

Графики зависимости удельных энергозатрат и мощности погрузки от скорости подачи очистного комбайна, полученных на основе регрессионных зависимостей, приведены на рис. 4.

Характер полученных графиков не противоречит данным исследований [2,3]. Таким образом, приведенные регрессионные зависимости $W_{пог}$ и $P_{пог}$ от V_n могут быть использованы для оценки энергетических параметров работы современных очистных комбайнов со шнековым исполнительным органом для тонких пологих пластов.

Анализ зависимостей (см. рис. 4) показывает, что с увеличением скорости подачи очистного комбайна мощность и удельные энергозатраты погрузки изменяются нелинейно. Причем при достижении значения скорости подачи 6 м/мин наблюдается интенсивный рост этих показателей. В [4] показано, что требуемая интенсификация добычи угля в тонких пологих пластах определяет необходимость повышения скорости подачи очистного комбайна до 10…14 м/мин. В соответствии с проведенным анализом это влечет повышение мощности погрузки до 100 кВт и более.

С целью прогноза увеличения габаритов и массы m выемочной машины при увеличении суммарной мощности P приводов проанализирован ряд отечественных и зарубежных комбайнов, которые используются при добыче угля из тонких пологих пластов.

На рис. 5 показаны соотношения массы очистного комбайна для тонких пологих пластов и суммарной мощности двигателей приводов исполнительных органов для современных

Табл.1. Результаты обработки экспериментальных данных работы очистного комбайна УКД400

Параметр	Значение		
Длительность замера, с	20	17	60
Пройденный комбайном путь, м	1,5		
Скорость подачи, м/мин	4,50	5,30	3,75
Производительность, т/мин			
опережающий ИО	3,86	4,54	3,21
отстающий ИО	1,33	1,56	1,11
Удельные энергозараты, кВт ч/т			
опережающий ИО	0,46	0,31	0,20
отстающий ИО	0,38	0,22	0,13
на погрузку горной массы	0,08	0,09	0,07
Мощность, затраченная на погрузку, кВт	18,6	25,2	14,0

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

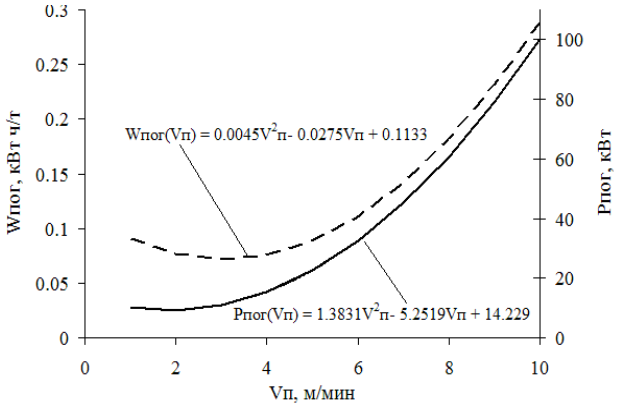


Рис. 4. Графики зависимости удельных энергозатрат и мощности погрузки от скорости подачи очистного комбайна

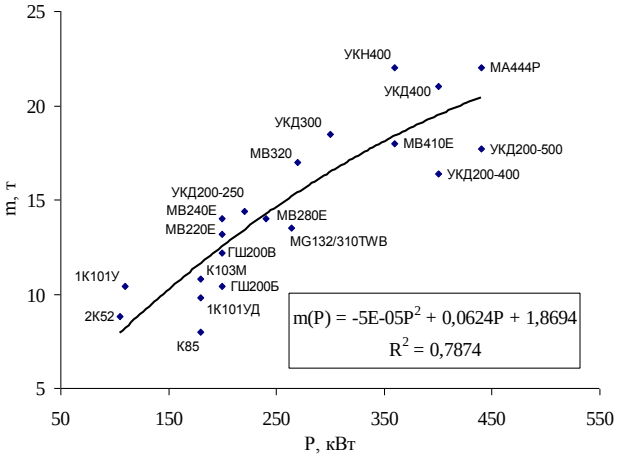


Рис. 5. График зависимости массы очистного комбайна от суммарной мощности приводов исполнительных органов

моделей комбайнов. На основе этих данных установлена регрессионная зависимость:

$$m(P) = -m_1 \cdot P^2 + m_2 \cdot P + m_3 \ [\text{т}],$$

где m_1=0,00005, m_2=0,0624, m_3=1,8694 – коэффициенты уравнения регрессии.

Выполненный анализ показывает, что интенсификация добычи угля из тонких пологих пластов требует существенного увеличения мощности приводов исполнительных органов (в том числе из-за большой энергоемкости погрузки) и, как следствие, массы и габаритов комбайна в целом, что усложняет конструкцию машины, ухудшает вписываемость в гипсометрию пласта.

Выводы

Разработана методика определения удельных энергозатрат разрушения и погрузки очистных комбайнов для тонких пластов в реальных условиях эксплуатации на основе фиксации значений токов двигателей приводов резания. Такая фиксация может осуществляться на основе обработки данных записей регистраторов произошедших событий, которыми оснащаются очистные комбайны нового технического уровня с раздельными приводами на каждый исполнительный орган.

Получены зависимости удельных энергозатрат и мощности погрузки разрушенной горной массы от скорости перемещения очистного комбайна, которые могут быть описаны уравнениями регрессии параболического вида: $W_{пог}(V_n)=w_1 \cdot V^2_n+w_3$ и $P_{пог}(V_n)=p_1 \cdot V^2_n - p_2 \cdot V_n+p_3$.

Для интенсификации добычи угля из тонких пологих пластов требуется существенное увеличение мощности приводов исполнительных органов из-за большой энергоемкости процесса погрузки и, как следствие, массы и габаритов комбайна в целом.

Интенсификации добычи угля из тонких пологих пластов за счет повышения скоростей перемещения V_n до уровня 10-14 м/мин требует значения мощности погрузки свыше 100 кВт. Это определяет необходимость и актуальность дополнительных исследований, направленных на повышение эффективности процесса погрузки для комбайнов, работающих в условиях тонких пластов.

Список литературы

1. Горбатов, П.А. Горные машины для подземной добычи угля: Учебное пособие для вузов / П.А. Горбатов и др. Под общей редакцией П.А. Горбатова. 2-е издание, переработанное и дополненное. – Донецк: Норд Компьютер, 2006. – 669 с.
2. Бойко, Н.Г. Очистные комбайны для тонких пластов.– Донецк: ДонНТУ, 2010. – 476 с.
3. Механо-гидравлические шнековые системы выгрузки и транспортирования. В.Г. Нечепаев. – Донецк: ДонНТУ, 2005. – 215с.
4. Косарев, И.В. Повышение производительности очистных комбайнов с вынесенной системой подачи / И.В.Косарев, А.В, Мезников // Вестник Донецкого национального технического университета. – № 6. – 2016. – С. 19-23.
5. Кудлай, Р.А. Блок регистрации произошедших событий на проходческом комбайне / Р.А. Кудлай, А.В. Мезников, Н.И. Стадник // Решение научно-технических проблем при создании и внедрении современного горношахтного оборудования. – Донецк: Астро, 2008. – С. 647-660.
6. Nechepaev, V.G. Synthesis of mechano-hydrodynamic actuators of coal cutter-loader / V.G. Nechepaev // Magdeburger Maschinenbau-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Tage. – Tagungasband I. – Logos Verlag Berlin, 1997. – P. 35-43.
7. Nechepaev, V. Creation of transport devices of the increased efficiency for moving loose materials / V. Nechepaev, A. Semenchenko // BULETINUL INSTITUTULUI POLITEHNIC DIN IAŞI. Publicat de Universitatea Tehnică "Gh. Asachi", Tomul XLVI(L), Supliment 1, 2000. – P. 187-190.
8. Nechepaev, V. The theory of functioning of mechano-hydrodynamic screw transport devices / V. Nechepaev, I. Navka // International scientific conference "Advanced Manufacturing Technologies" CITAF-2001, Bucharest, 2001. – P. 318-319.
9. Гуляев, В.Г. Проектирование и конструирование горных машин и комплексов. Ч.1. Выемочные комбайны. (Теория рабочих процессов и методы повышения надежности): учеб. пособие. – Донецк: ДонНТУ, Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ», 2011. – 322 с.
10. Кондрахин, В.П. Электрические механизмы перемещения очистных комбайнов / В.П. Кондрахин, В.В. Косарев, Н.И. Стадник. Под общ. ред. В.П. Кондрахина. – Донецк: Технопарк ДонНТУ «УНИТЕХ», 2010. – 257 с.
11. Шабаев, О.Е. Техническая диагностика резцового исполнительного органа проходческого комбайна / О.Е. Шабаев, И.И. Бридун, Н.В. Хиценко. Под общ. ред. О.Е. Шабаева. – Донецк: Технопарк ДонНТУ «УНИТЕХ», 2015. – 200 с.

O.E. Shabaev /Dr.Sci. (Eng.)/, V.G. Nechaev /Dr.Sci. (Eng.)/, P.P. Zinchenko
Donetsk National Technical University (Donetsk)
A.V. Meznikov, A.V. Kovalenko
Donetsk Scientific-Research Design Institute of Complex Mechanization of Mines (Donetsk)

THE METHOD TO DETERMINE SPECIFIC ENERGY CONSUMPTION OF CUTTING-LOADING BY SHEARERS FOR LOW COAL SEAMS IN REAL OPERATING CONDITIONS

Background. *The creation of a modern shearer requires knowledge of the actual loads on its power system, recorded in real operating conditions. This requires the development of a method to determine the energy indicators of performance of the shearers for low coal seams.*
Materials and/or methods. *When solving the tasks the experimental-analytical method used of data processing of the actual values of the motor currents of the actuators of the working bodies recorded by the past events recording device; coal height; shearer speed.*
Results. *The method developed to determine the energy parameters of the shearer performance equipped with recorders of past events on the basis of data obtained as a result of the operation of the shearer in real operating conditions. The dependence of the capacity and specific energy consumption of the movement speed of the shearer determined, as well as the shearer mass of the total capacity of the cutting drives.*
Conclusion. *With the intensification of the shearers work in low coal seams and increasing shearer speed to 10-14 m/min, additional research required to improve the efficiency of the loading process.*

Keywords: *shearer, screw working body, performance, shearer speed, specific energy consumption.*

Сведения об авторах
О.Е. Шабаев
SPIN-код: 1447-2343
ORCID iD: 0000-0002-0845-7449
Телефон: +380 (95) 429-13-32
Эл. почта: oeshabaev@ya.ru
П.П. Зинченко
Телефон: +380 (66) 427-45-36
Эл. почта: pawel.zin4encko@yandex.ru
А.В. Коваленко
Телефон: +380 (95) 178-53-47
Эл. почта: gu.donuglemash@yandex.ru
В.Г. Нечепаев
Телефон: +380 (95) 419-07-43
Эл. почта: nechepayev@mech.donntu.org
А.В. Мезников
Телефон: +380 (66) 763-83-78
Эл. почта: gu.donuglemash@yandex.ru

Статья поступила 19.12.2017 г.
© О.Е. Шабаев, В.Г. Нечепаев, П.П. Зинченко, А.В. Мезников, А.В. Коваленко, 2017
Рецензент д.т.н., проф. В.П. Кондрахин

УДК 621.867.2

В.Н. Скляров
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РОЛИКОВ ШАХТНЫХ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ ПОВЫШЕННОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

Предложена конструкция пылевой камеры для испытаний ролика с металлофторопластовыми подшипниками скольжения, которые могут работать в шахтных условиях без смазки. Приведены результаты стендовых и приемочных испытаний опытной партии из 30 роликов. Установлено, что сопротивление вращению опытных роликов с бочкообразной формой корпуса подшипника соизмеримо с сопротивлением вращению контрольной партии роликов с подшипниками качения.

Ключевые слова: *ролик, конвейер ленточный, подшипник скольжения, пылевая камера, работоспособность, долговечность.*

Постановка проблемы

Одним из наиболее распространенных видов транспорта для горной промышленности являются ленточные конвейеры. Они обеспечивают практически любую требуемую производительность транспортных комплексов, которая может составлять 1000-2000 т/ч [1-3]. Срок службы ленты конвейера в значительной мере определяется работоспособностью роликоопор, на долю которых приходится до 30 % от первоначальной стоимости конвейера [4].

От обоснованности параметров ленточного конвейера во многом зависит его эффективность. Особенно это важно для выбора коэффициента сопротивления вращению роликов. Если расчетное значение этого коэффициента превышает фактическое значение, то затрудняется запуск ленточного конвейера, а если его значение ниже, то установленная мощность привода будет использоваться не в полной мере, что приводит к неэффективному использованию конвейера. Кроме того, коэффициент сопротивления вращению роликов в значительной степени определяет затраты электроэнергии на транспортировку грузов и ресурс ленты конвейера.

Однако до настоящего времени еще недостаточно исследовано взаимодействие роликоопор со ставом и конвейерной лентой, не определены значения коэффициента сопротивления при автоколебаниях системы «роликоопора-ставконвейерная лента». Особенно это относится к роликам с металлофторопластовыми втулками, позволяющими увеличить их ресурс. Поэтому экспериментальное исследование роликоопор и роликов, имеющих подшипниковые узлы нового технического уровня, является актуальной проблемой.

Анализ последних исследований и публикаций

Исследованию взаимодействия роликов с конвейерной лентой шахтных конвейеров посвящен ряд работ [5-7]. Практика рационального выбора параметров ленточных конвейеров, обеспечивающих снижение энергопотребления, исследована в публикациях [8-9]. Проведенный анализ [10-12] показал, что в настоящее время на шахтах Донбасса в роликах ленточных конвейеров практически не применяются подшипники скольжения. Настоящая работа является продолжением указанных исследований.

Цель (задачи) исследования

Целью стендовых испытаний являлась сравнительная качественная и количественная оценка эксплуатационных показателей роликов с металлофторопластовыми втулками и серийных роликов с подшипниками качения для проверки возможности применения первых в промышленных условиях.

Основной материал исследования

Металлофторопластовое покрытие выгодно отличается от других полимерных покрытий. Основной областью применения данного покрытия являются узлы сухого трения. Металлофторопласт [13] допускает довольно высокие удельные нагрузки (до 350 МПа) в широком диапазоне температур (от -25^0 до $+300^0$С); имеет коэффициент термического расширения и теплопроводность, как у стали; на поверхности не появляется статическое электричество, фреттинг-коррозия и ложное бренеллирование.

Научно-исследовательские работы, проведенные в Донецком национальном техническом уни-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

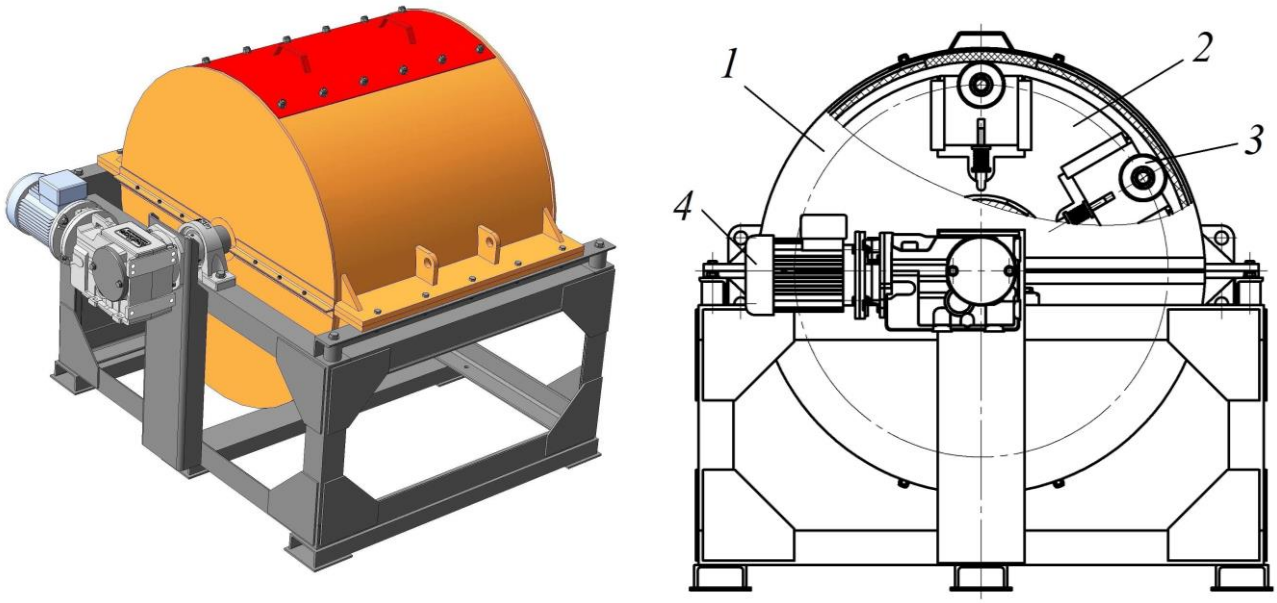
верситете, позволили разработать конструкции роликов ленточных конвейеров с металлофторопластовыми подшипниками скольжения [14-15], опытная партия которых прошла экспериментальные исследования в два этапа. Вначале выполнены стендовые испытания в лабораторных условиях кафедры «Горнозаводской транспорт и логистика» ДонНТУ, а далее – промышленные испытания на ленточном конвейере породного комплекса шахтоуправления «Донбасс» производственного объединения «Донецкуголь».

Лабораторные исследования проводились согласно программе и методике стендовых испытаний роликов. Согласно этой программе разработана пылевая камера, принципиальная схема которой приведена на рис. 1.

Пылевая камера представляет собой закрытый цилиндрический кожух, состоящий из корпуса и крышки. Кожух с внутренней стороны футерован конвейерной лентой. В кожухе размещен ротор, который состоит из вала с расположенными на нем двумя дисками. Диски на валу можно переустанавливать для различной длины роликов. В дисках предусмотрены окна для установки прижимных устройств роликов. Одновременно на ротор пылевой камеры можно устанавливать шесть испытуемых роликов диаметром до 127 мм. На роторе предусмотрена установка скребков, которые, касаясь футеровки кожуха, поднимают частицы пыли, создавая необходимый пылевой режим. Ротор камеры приводится во вращение приводом, состоящим из асинхронного электродвигателя и конического редуктора. При этом линейная скорость вращения обечайки ролика при испытании составляла 2,5±0,25 м/с, что соответствует допустимому пределу скорости движения ленты современных ленточных конвейеров для горных предприятий. Для контроля запыленности воздуха методом отбора проб в кожухе камеры предусмотрены отверстия, которые открывают только на время выполнения замеров.

Камера работает следующим образом. Через люк в крышке кожуха устанавливаются в прижимные устройства испытуемые ролики. После установки всех роликов засыпают в камеру пыль и люк закрывают. При включении камеры в работу ротор приводится во вращение, и ролики, расположенные на нем, обкатываются по футеровке кожуха. Скребки, захватывая частицы пыли, создают запыленность воздуха.

Запыленность воздуха в камере составляла 10 г мелкодисперсной пыли на 1 м^3 воздуха. Крупность частиц пыли составляла до 0,1 мм. Состав пыли включал 50 % формовочной смеси литейных цехов и 50 % кварцевого песка. Концентрация пыли измерялась через 16 часов работы пылевой камеры. Контроль осуществлялся методом отбора проб с помощью аспиратора М 822, используемого санитарной инспекцией. Для этого производился расчет запыленности воздуха $K=q/(\omega t)$, г/м^3, где q – масса пыли, осевшей на фильтре, г; t – время оседания пыли, мин; ω – расход воздуха, м^3/мин. Количество закладываемой в камеру пыли устанавливалось опытным путем, а величина запыленности воздуха контролировалась в процессе испытаний и поддерживалась в заданных пределах.



а б

Рис. 1. Пылевая камера для стендовых испытаний роликов:
а – общий вид; *б* – принципиальная схема (*1* – кожух, *2* – ротор, *3* – ролик, *4* – привод)

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Согласно программе испытаний роликов количественно оценивалось сопротивление вращению ролика и радиальный зазор в подшипниковых узлах. Сопротивление вращению роликов определялось на стенде (рис. 2), который состоит из следующих элементов: станка токарно-винторезного со снятым механизмом подачи рычага балансира с хомутом и динамометра РН-10Ц139-77 ТУ 25.06.575-77 с ценой деления 5 г.

Перед замерами ролики обкатывались по 5 мин в одну сторону, а замеры производили, вращая ролик поочередно в обе стороны. Для этого на испытуемый ролик надевался хомут рычага-балансира. Ролик устанавливался на токарном станке. При этом один конец оси ролика зажимался в трехкулачковом патроне станка, а другой конец удерживался центром задней бабки, входящим в центровочное отверстие оси, а обечайка ролика с рычагом-балансиром могла свободно вращаться вокруг продольной оси ролика.

Для определения силы сопротивления вращению ролика рычаг-балансир опирался на динамометр. При включении станка рычаг-балансир нагружал динамометр и его показания регистрировались. Далее направление вращения станка реверсировалось и вновь регистрировалось усилие. Среднее значение из этих показаний и являлось силой сопротивления вращению ролика на плече рычага-балансира при заданной скорости вращения оси ролика.

Радиальный зазор в подшипниках ролика измерялся на специальном стенде (рис. 3), который состоит из: рамы 1 с двумя опорами, кронштейна 2, индикатора часового типа 3 и рычага 4. Каждая опора в верхней части имеет треугольный вырез для установки оси ролика 5, которая в опорах фиксируется с помощью планки 6.

Ось ролика жестко закреплялась в опорах с помощью планки и болтов. Сверху на ролик накладывалась планка, один конец которой шарнирно закреплялся на раме. Индикатор подводился к обечайке, и его начальные показания регистрировались. Затем под ролик устанавливался рычаг, который своим весом поднимал обечайку ролика относительно его оси. После этого снимали новые показания индикатора. Разность этих показаний соответствовала радиальному зазору в подшипнике. При этом зазор замерялся в каждом подшипнике в двух взаимно перпендикулярных направлениях перед испытаниями в пылевой камере и по их завершении.

Опытная партия состояла из 20 роликов с цилиндрической формой корпуса подшипника и 10 роликов – с бочкообразной формой по внешней поверхности корпуса подшипника. Кроме того, контрольная партия состояла из 30 роликов с подшипниками качения.

Ролики опытной и контрольной партий проходили обкатку в пылевой камере в течение 16 часов, после чего были сняты данные о силе сопротивления вращению роликов и радиальным зазорам в подшипнике. Замеры проводились при частоте вращения шпинделя станка 375 об/мин, что соответствовало окружной скорости обечайки ролика 2,5 м/с.

Далее ролики устанавливались на ленточном конвейере породного комплекса шахтоуправления «Донбасс» производственного объединения «Донецкуголь», где проработали 921 час. За это время конвейером было перевезено 476 тыс. тонн породы. За время испытаний перегрева и отказов роликов опытной партии не зафиксировано. После этого проводились повторные замеры контролируемых параметров, значения которых приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, опытные ролики с бочкообразной формой корпуса подшипника до начала испытаний имели сопротивление вращению более чем в 2 раза меньше, чем ролики с корпусами подшипников цилиндрической формы. После испытаний это соотношение составило 1,4. По нашему мнению это можно объяснить тем, что бочкообразная форма корпуса подшипника позволяет компенсировать неточности изготовления и монтажа, которые могут вызывать перекосы подшипников скольжения.

Табл. 1. Результаты испытаний роликов

Типы роликов	Износ подшипников, мм	Сила сопротивления вращению роликов, приведенная к его обечайке, Н	
		до начала испытаний	в конце испытаний
Контрольная партия роликов с подшипниками качения	0,047±0,010	14,1±2,8	6,92±1,0
Ролики опытной партии с цилиндрической формой корпуса подшипника	0,062±0,009	20,5±0,82	9,05±1,3
Ролики опытной партии с бочкообразной формой корпуса подшипника	0,067±0,019	9,35±0,39	6,45±1,0

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

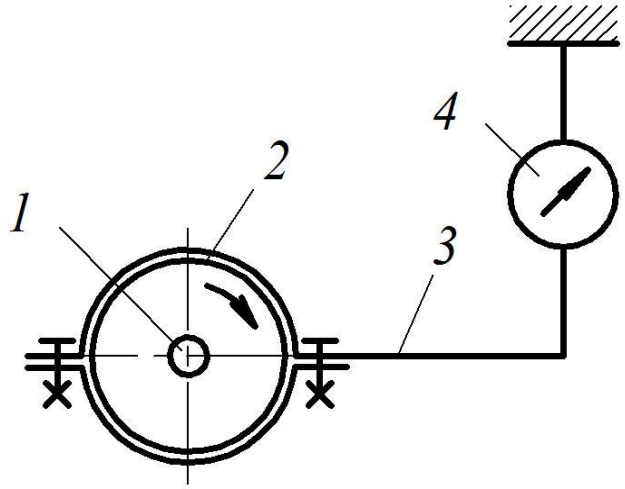


Рис. 2. Схема стенда для измерения сопротивления вращению роликов: *1* – ось ролика, *2* – обечайка ролика, *3* – рычаг, *4* – динамометр

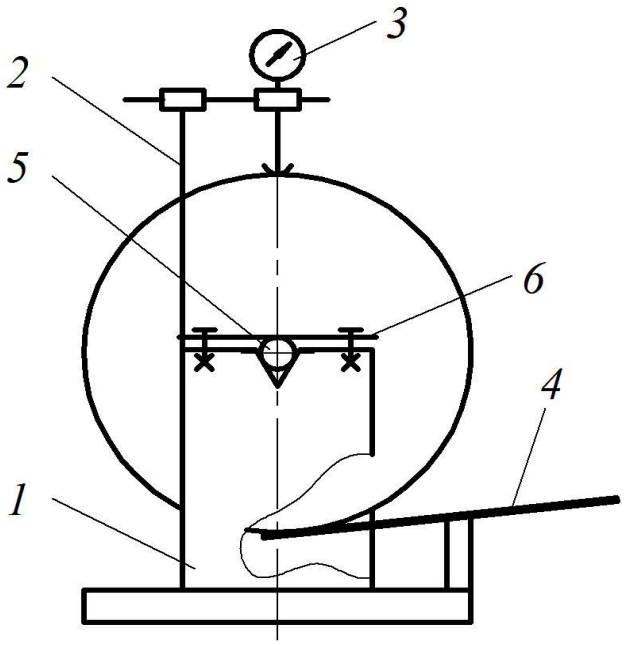


Рис. 3. Схема стенда для измерения радиального зазора в подшипниковых узлах роликов, где: *1* – рама, *2* – стойка, *3* – индикатор часового типа, *4* – рычаг, *5* – ось ролика, *6* – планка

Сопротивления вращению роликов с бочкообразной формой корпуса металлофторопластового подшипника скольжения соизмеримы с сопротивлениями вращению роликов с подшипниками качения. Это показывает, что применение роликов с металлофторопластовыми подшипниками не приводит к увеличению энергозатрат ленточного конвейера. При этом ресурс ролика до капитального ремонта может составлять до 9000 часов и превышать ресурс роликов с подшипниками качения в 6 раз.

Выводы

Обоснована целесообразность применения металлофторопластовых подшипников скольжения в роликах шахтных ленточных конвейеров вместо подшипников качения. При этом ресурс ролика до первого капремонта увеличивается в 6 раз и составляет 9000 часов.

Сопротивления вращению роликов с бочкообразной формой корпуса металлофторопластового подшипника скольжения соизмеримы с сопротивлениями вращению роликов с подшипниками качения.

За время испытаний перегрева и отказов роликов с металлофторопластовыми подшипниками скольжения не зафиксировано.

Список литературы

1. Галкин, В. И. Проблемы совершенствования транспортных систем в горной промышленности / В. И. Галкин, Е. Е. Шешко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал): Труды научного симпозиума «Неделя горняка-2011». Отдельный выпуск №1 .– М.: Горная книга, 2011. – С. 458–507.
2. Техника и технология погрузки, разгрузки, транспортирования и складирования в энергоемких производствах // В. А. Будишевский, В. О. Гутаревич, В. Н. Маценко и др.; ред. В. А. Будишевский, А. А. Сулима. – Донецк: ДонГТУ, 2000. – 350 с.
3. Czaplicki, J. M. Mining Equipment and Systems: Theory and Practice of Exploitation and Reliability // J. M. Czaplicki. – London: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. – 296 p.
4. Сидоров, Ю. П. Ролики ленточных конвейеров: обзор / Ю. П. Сидоров – М.: ЦНИИТЭИТЯЖМАШ, 1990. – 37 с.
5. Furmanik, K. J. Analysis of load application on idler roller bearing of belt conveyor in different dynamic models / K. J. Furmanik // Journal of Friction and Wear. – 2009. –Vol. 30. Iss. 2. – P. 142-147.
6. Yuan, X. Q. Analysis and Design of the Roller for Belt Conveyor Based on ANSYS / X. Q. Yuan, S. Y.Yang, Q. Y. Niu // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 1027. – P. 315-319.
7. Fedorko, G. The Calculation of Force Effects of a Conveyor Belt of the Pipe Conveyor to Forming Rollers by FEM / G. Fedorko, V. Molnár, P. Michalik // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 806. – P. 181-186.
8. Грудачев, А. Я. В. Практика рационального выбора конвейерных лент для предприятий угольной промышленности / А. Я. Грудачев,

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Ю. А. Беломестнов, Н. В. Хиценко // Горная техника. – СПб: ООО "Славутич", 2010. – С. 108-113.
9. Грудачев, А. Я. Выбор рациональных параметров ленточных конвейеров, обеспечивающих снижение энергопотребления / А. Я. Грудачев, А. А. Кремешная, А. И. Максецкий // Энергосбережение. – 2004. – № 4. – С. 21-23.
10. Проектування транспортних систем енергоємних виробництв / В. О. Будішевський, В. О. Гутаревич, О. О. Пуханов та ін.; ред. В. О. Будішевський, А.О. Суліма. – Донецьк: Друк-Інфо, 2008. – 454 с.
11. Проектування та конструювання транспортних машин та комплексів / В. О. Будішевський, В. М. Маценко, В. І. Дворников та ін.; ред. В. О. Будішевський. – Донецьк: Норд-Пресс, 2009. – 599 с.
12. Корнеев, С. В. Анализ факторов, определяющих силу сопротивления вращению роликов ленточных конвейеров / С. В. Корнеев, В. П. Долгих // Сб. науч. трудов ДонГТУ. – Вып. 41. – 2013. – С. 33-36.
13. Курицына, А. Д. Композиционные материалы и покрытия на базе фторопласта-4 для сухого трения подшипников скольжения / А. Д. Курицына, И. П. Истомин. – М.: НИИМАШ, 1971. – 52 с.
14. Скляров, В. Н. Обоснование перспективных направлений конструирования роликоопор ленточных конвейеров на основе критериев долговечности / В. Н. Скляров // Сборник трудов XVII Международной научно-технической конференции «Горная энергомеханика и автоматика», г. Донецк, 21-23 ноября 2017 г. – Донецк: ДонНТУ, 2017.– С.68-75.
15. Скляров, В. Н. Результаты испытаний роликов ленточных конвейеров повышенной долговечности / В. Н. Скляров // Сборник трудов XXIV Международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века», г. Севастополь 11-17 сентября 2017 г. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – С. 233-236.

V.N. Sklyarov
Donetsk National Technical University (Donetsk)

EXPERIMENTAL STUDIES OF ENHANCED DURABILITY ROLLERS FOR MINE BELT CONVEYORS

Background. *The paper deals with the problem of low durability of rollers with rolling bearings used in mines with heavy dust environment. The objective of this work is to perform comparative qualitative and quantitative performance evaluation of rollers with metal-fluoroplastic bushings and the serial rollers with rolling bearings to verify that the first can be used in an industry.*
Materials and/or methods. *The author carried out an analysis of the structures of the rollers of both domestic and leading foreign firms. The design proposed of the roller with metal-fluoroplastic friction bearings which are not prone to jamming in mine conditions, as it can work without lubrication.*
Results. *The results of benchmark and acceptance tests of an experimental batch of 30 rollers presented. Established that the resistance to rotation of the tested rollers with barrel-shaped bearing housing after the acceptance testing for 921 hours, when 476 thousand tons of rock transported, commensurate with the resistance to rotation of the control batch of rollers with rolling bearings. Overheating or failure of the rollers of an experimental batch not recorded.*
Conclusion. *The expediency proved of the use of metal-fluoroplastic sliding bearings in rollers for coal mine belt conveyors instead of rolling bearings. The durability of a roller increases by 6 times and is 9000 hours.*

Keywords: *roller, belt conveyor, bearing, performance, durability.*

Сведения об авторе
В.Н. Скляров
Телефон: +380 (62) 301-08-54
Эл. почта: vladimirnikol777@mail.ru

Статья поступила 09.12.2017 г.
© В.Н. Скляров, 2017
Рецензент д.т.н., проф. О.Е. Шабаев

УДК 622.232.83.008.3

О.Е. Шабаев /д.т.н./, И.И. Бридун /к.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ПОЛОМОК РЕЗЦОВ ОСЕВОЙ КОРОНКИ ПРОХОДЧЕСКОГО КОМБАЙНА ТИПА П110-04

В работе показано, что эксплуатация проходческого комбайна с вышедшим из строя резцом может привести к существенному снижению ресурса элементов машины. Предложен метод диагностирования поломок резцов на продольно-осевой коронке в режиме реального времени на основе спектрального разложения тока в двигателе привода резания исполнительного органа. Установлено, что в качестве диагностируемого параметра может быть принято отношение коэффициентов спектрального разложения, соответствующих частоте вращения коронки и ее утроенному значению.

Ключевые слова: *проходческий комбайн, режущий инструмент, исполнительный орган, диагностика.*

Постановка проблемы

Анализ перспектив применения высокоэффективных добычных комплексов показал, что темп проходки выработок должен быть существенно повышен, что может быть достигнуто только при эффективном использовании потенциальных возможностей проходческой техники, в том числе при параметрах исполнительного органа, обеспечивающих эффективное разрушение горной породы. Износ и поломки резцов зависят от многих факторов и не могут быть с достаточной точностью спрогнозированными до начала эксплуатации комбайна в конкретных условиях.

Применяемая операторами комбайнов стратегия замены изношенных резцов на базе визуального осмотра малоэффективна, так как приводит к эксплуатации машины с чрезмерно изношенными или поломанными резцами. Так, по результатам промышленных испытаний резцов фирмой «Горный инструмент» [1] в очистных забоях шахт Кузбасса получены данные о причинах отказа этих резцов: износ корпуса односторонний с выломом режущей вставки составляет 45 %; износ корпуса равномерный – 27 %; потери резцов – 25 %; излом корпуса резца – 3 %.

Согласно этим экспериментальным результатам, лишь 27 % резцов вырабатывают свой ресурс полностью. Почти 50 % резцов выходят из строя преждевременно, а 25 % резцов – теряются.

В результате несвоевременная замена изношенных резцов может привести к существенным отклонениям показателей технического уровня комбайна от нормативных значений согласно его технической характеристике.

Анализ последних исследований и публикаций

В работе [2] установлено, что длительная работа проходческого комбайна с продольно-поперечной коронкой и вышедшим из строя резцом может приводить к существенному снижению ресурса элементов трансмиссии исполнительного органа – на величину до 60-70 %. Существующие методики технической диагностики состояния рабочего инструмента основаны на визуальном осмотре исполнительного органа на предмет наличия резцов на коронке, что требует остановки комбайна. Такая стратегия замены малоэффективна, так как приводит к эксплуатации машины с поломанными или отсутствующими резцами.

Для проходческого комбайна КПД с аксиальными коронками разработана методика определения поломок резцов [3]. Вместе с тем режим обработки забоя исполнительными органами, оснащенными осевыми коронками (П110-4 и другие комбайны), существенно отличается от режимов работы аксиальных коронок, что требует дополнительных исследований.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является установление параметров диагностирования состояния исполнительного органа проходческого комбайна П110-04, оснащенного продольно-осевой коронкой, и предельных значений параметров диагностирования, обеспечивающих повышение ресурса машины.

Основной материал исследования

Модельные исследования были проведены на основе математической модели формирования

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

вектора внешнего возмущения, действующего на продольно-осевую коронку [4]. Основными факторами, влияющими на характеристики рабочего процесса проходческого комбайна, являются: характеристики разрушаемого забоя – сечение, структура, крепость породных слоев; параметры технического состояния комбайна; схема обработки забоя – последовательность режимов разрушения, их параметры (скорость подачи и вращения коронки, глубина зарубки и шаг фрезерования).

Следует отметить, что для проходческого комбайна избирательного действия существует три режима обработки забоя: зарубка, боковой рез, вертикальный рез (вверх/вниз). При этом зарубка, как правило, осуществляется в наиболее слабом месте забоя (угольный пласт), что обуславливает более низкие максимальные нагрузки на исполнительном органе, чем в других режимах, и, как следствие, не оказывает влияния на формирование накопленной повреждаемости. Поэтому режим зарубки при планировании модельного эксперимента не учитывался.

Последовательность режимов обработки забоя при определении накопленной повреждаемости в элементах трансмиссии привода исполнительного органа комбайна также не учитывается, так как согласно [5] исходными данными для расчета элементов трансмиссии являются данные диаграммы нагружения.

Параметры реальной конструкции коронки ввиду погрешностей технологии изготовления отличаются от заданных параметров схемой набора. Эти отклонения были учтены в вычислительном эксперименте как дополнительный случайный фактор путем ввода в математическую модель случайных величин, моделирующих отклонения координат резцов.

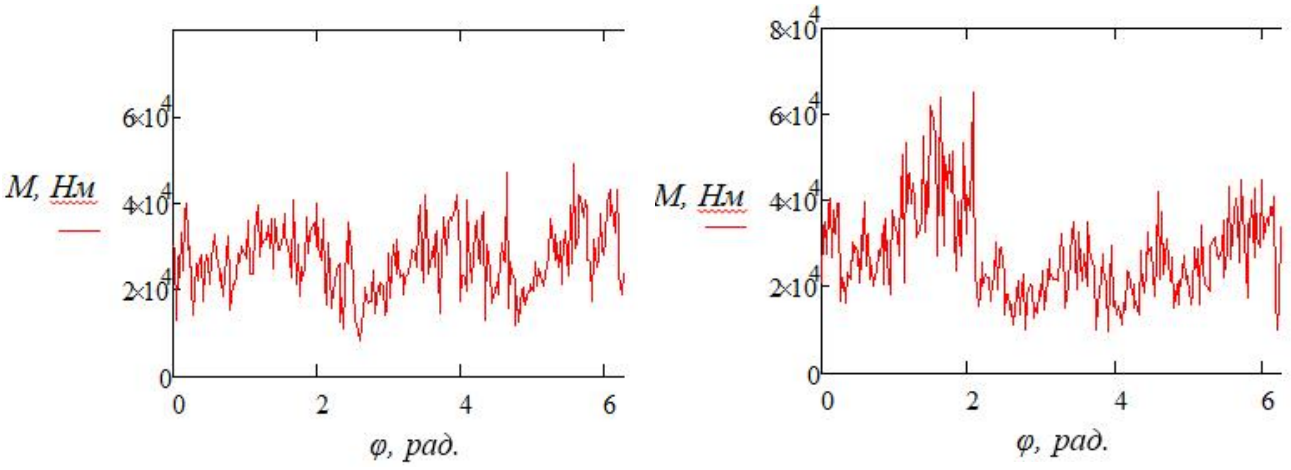
Параметры режима разрушения забоя коронками – глубина зарубки ΔL, шаг фрезерования ΔH, скорость подачи Vn и вращения ω – существенно влияют на нагруженность исполнительного органа. Поэтому при планировании вычислительного эксперимента задавались различные значения ΔL и ΔH (с учетом конструкции исполнительного органа), а значения скоростей подбирались с учетом физико-механических свойств породы для обеспечения максимальной производительности.

Эксперимент реализовывался как полнофакторный, с перебором всевозможных сочетаний. Регистрируемыми параметрами являлись момент в трансмиссии и ток приводного двигателя. В качестве примера на рис. 1 приведены фрагменты изменения крутящего момента за один оборот коронки.

Как показали результаты моделирования, выход резца из строя приводит к значительному росту динамичности нагрузок и, в первую очередь, за счет увеличения неравномерности низкочастотной составляющей нагрузки (частота вращения коронки). Для случаев полного комплекта резцов и отсутствия в схеме набора 6-го резца построена диаграмма нагружения, приведенная на рис. 2.

Анализ рис. 2 показал, что поломка резца приводит к повышению вероятности максимальных и минимальных значений момента при некотором снижении вероятности его средних значений. Это подтверждает, что при отсутствии резца изменяется наколенная повреждаемость в элементах трансмиссии, что оказывает влияние на ресурс.

В качестве количественной характеристики оценки ресурса комбайна принималась накопленная повреждаемость. Накопленная повреждаемость рассчитана по зависимости:



а б

Рис. 1. Изменение крутящего момента, формирующегося на коронке при одном обороте исполнительного органа в режиме бокового реза: *а* – при наличии всех резцов, *б* – при отсутствии 6-го резца

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

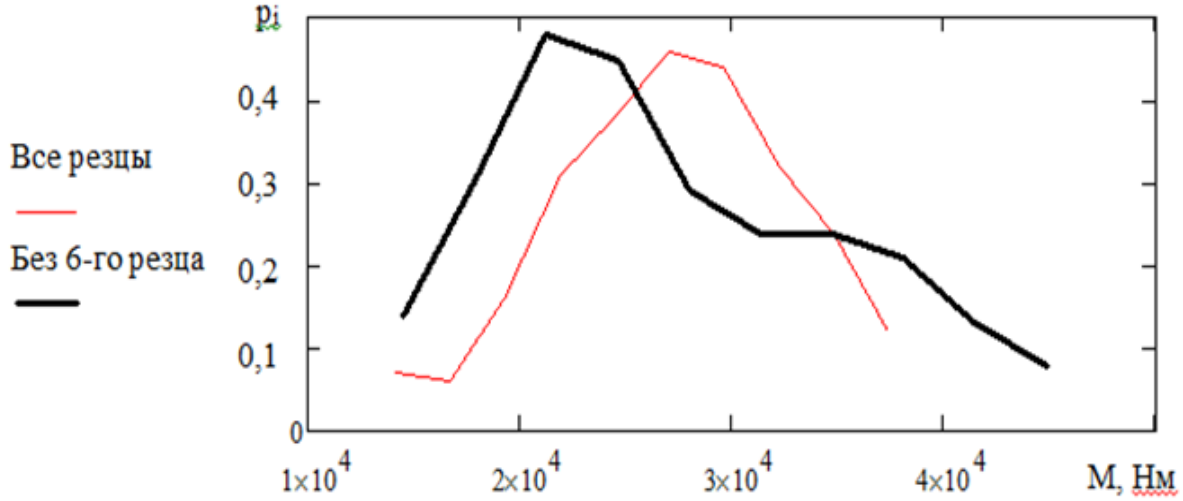


Рис. 2. Распределение вероятности момента сопротивления на исполнительном органе комбайна в режиме бокового реза

$$НП_V = \frac{30\omega}{\pi S V_n} \int_0^{M_{\max}} M^m f(M) dM,$$

где ω, M – угловая скорость и передаваемый крутящий момент рассматриваемого элемента трансмиссии; S – проекция разрушаемой поверхности забоя в направлении подачи коронки; V_n – скорость подачи коронки на забой; M_{max} – значение крутящего момента, соответствующее для рассматриваемого элемента трансмиссии пределу текучести; m – показатель степени кривой усталости для рассматриваемого элемента; $f(M)$ – плотность вероятности крутящего момента.

Изменение ресурса элементов трансмиссии при постоянной работе с поломанным резцом, по сравнению с работой при полном комплекте резцов, оценивалось в процентах:

$$\delta T = 100 \frac{НП_L^{-1} - НП'^{-1}_L}{НП_L^{-1}},$$

где $НП_L$, $НП'_L$ – повреждаемости, накопленные за метр проходки выработки при работе с полным комплектом резцов и с поломанным резцом, соответственно.

Анализ результатов вычислительного эксперимента показывает существенное (1,2-4 раза) снижение ресурса элементов исполнительного органа при отсутствии 4-го, 6-го и 7-го резцов. При этом следует отметить, интенсивность изменения ресурса сильно возрастает при уменьшении сечения коронки и, как следствие, уменьшении количества резцов, контактирующих с массивом, что характерно при разрушении породы высокой крепости. Таким образом, одним из направлений повышения ресурса элементов трансмиссии привода исполнительного органа проходческого комбайна может быть диагностирование без остановки машины состояния резцов при разрушении крепких пород.

Современные проходческие комбайны оснащены средствами контроля рабочих параметров элементов машины, при этом, как правило, контролируется величина тока в двигателе привода резания исполнительного органа. Поэтому в качестве фиксируемого параметра для диагностики технического состояния коронки принимаем ток двигателя. В качестве характеристик процесса изменения тока в двигателе принимаем коэффициенты спектрального разложения тока, получаемые методом Фурье:

$$k_j = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\left(\sum_{k=1}^{n} x_k \cos\left(\frac{2\pi jk}{n}\right)\right)^2 + \left(\sum_{k=1}^{n} x_k \sin\left(\frac{2\pi jk}{n}\right)\right)^2},$$

$$j = 1 \ldots \frac{n}{2}.$$

При этом выбираем коэффициенты амплитуд спектрального разложения, соответствующие частоте вращения исполнительного органа – k_1 и частоте вращения спирали – k_3 (исполнительный орган имеет 3 спирали).

Некоторые результаты обработки данных модельного эксперимента по определению величины k_{13}, соответствующей отношению коэффициентов k_1 к k_3 , приведены в табл. 1.

Анализ таблицы показывает, что в случае отсутствия резцов, оказывающих существенное влияние на ресурс элементов трансмиссии, минимальное значение коэффициента k_{13} с вероятностью 0,9 – не меньше 0,79, а при полном комплекте резцов величина этого же коэффициента не превышает значения 0,7.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Табл. 1. Изменение коэффициента k_{13} в случае отсутствия *i*-го резца при попутном фрезеровании

ΔL	ΔH	Все резцы исправные, k_{13max}	Отсутствует резец №, k_{13min}	
			1	4
300	450	0,691	0,465	1,249
	300	0,481	0,293	0,943
	160	0,418	0,269	0,792

Таким образом, в качестве критерия диагностирования отсутствия резцов можем принять условие: $(k_{13max})_{max} > k_{13j}$, где $(k_{13max})_{max}$ – максимальное значение коэффициента k_{13}, полученное в процессе обработки забоя с различными параметрами при наличии всех резцов в начале эксплуатации машины (самообучение комбайна); k_{13j} – текущая величина k_{13}, полученная за один оборот коронки в процессе эксплуатации комбайна.

Выводы

Длительная работа проходческого комбайна с вышедшим из строя резцом может приводить к снижению ресурса элементов трансмиссии исполнительного органа на величину до 400 % в зависимости от схемы разрушения, крепости породы и положения резца на коронке согласно схеме набора. Поэтому необходима разработка средств технической диагностики технического состояния режущего инструмента без остановки комбайна.

Установлено, что диагностика поломок резцов на продольно-осевой коронке в режиме реального времени может быть реализована на основе спектрального разложения фрагментов реализаций тока в двигателе привода резания исполнительного органа длительностью, соответствующей одному–трем оборотам коронки. Диагностируемым параметром, отвечающим требованиям воспроизводимости, чувствительности и однозначности, является отношение коэффициентов спектрального разложения, соответствующих частоте вращения коронки и ее утроенному значению.

Список литературы

1. Крестовоздвиженский, П. Д. Повышение прочности тангенциальных поворотных резцов горных очистных комбайнов / Автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.05.06 / Крестовоздвиженский Павел Дмитриевич. – Новокузнецк, 2011. – 146 с.
2. Shabaev, O.E. Assessment of influence of cutting tool breakage on drive life time of cutting unit of heading machine / O.E. Shabaev et al. // Management Systems in Production Engineering. – 2014. – No.1 (13). – P. 33-36.
3. Шабаев, О.Е. Диагностирование отказов резцов проходческого комбайна / О.Е. Шабаев [и др.] // Вісті Донецького гірничого ін-ту. – Донецьк: Донецький національний технічний університет. – 2013. – № 2 (33). – С. 240-250.
4. Шабаев, О.Е. Математическая модель процесса разрушения забоя проходческим комбайном с учетом отказов рабочего инструмента / О.Е. Шабаев, Н.В. Хиценко, И.И. Бридун // Наукові праці ДонНТУ. Серія гірничо-електромеханічна. – Донецьк: ДонНТУ, 2013. – Вип. 2(26). – С. 287-304.
5. ГОСТ 25.101–83. Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статического представления результатов. – Введ. 01.07.84. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 29 с.

O.E. Shabaev /Dr. Sci. (Eng.)/, I.I. Bridun /Cand. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)

DIAGNOSIS OF CUTTER FAILURES OF A LONGITUDINALLY ROTATING CUTTING HEAD OF THE HEADING MACHINE TYPE П110-04

Background. *The experience of the operation of heading machines shows that 50 % of cutters break down prematurely, and 25 % – lost. Breakage of the cutters depends on many factors and cannot be with sufficient accuracy predicted prior to the operation of the machine. Failure to replace the cutters in time can lead to significant deviations of indicators of the technical level of the machine from normative values. Development of a method to diagnose the state of the cutting tool of heading machines equipped with a longitudinally rotating cutting head is a topical scientific and technical problem.*

Materials and/or methods. *The method of simulation modeling of the working process of a heading*

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

machine adopted as the main method for research. In modeling the following factors considered: the coal face characteristics – section, structure, rock layers strength; the parameters of the technical condition of the machine; the coal face processing scheme – the sequence of breaking modes, their parameters (feed speed and rotation of the cutting head, depth of the notches and milling step). The experiment implemented with the exhaustive search of all possible combinations. The recorded parameters were torque in the transmission and the current in the drive motor. A spectral Fourier expansion of the motor current at frequencies multiple of the rotation frequency of the cutting unit used to detect breakage of the cutting tool.

Results. *It is established that in case of breakage of the cutter the torque in the transmission of the drive of the cutting unit is much more uneven in low-frequency component. A long work of heading machine with the broken cutter leads to a decrease in the resource of the transmission of the cutting unit by up to 400 % depending on the scheme of breakage, the strength of the rock, and the cutter position on the cutting head. It is established that the first coefficient of spectral expansion in case of breakage of the cutter increases substantially, while the third one, corresponding to the triple frequency of cutting head rotation, practically remains unchanged. The diagnosed indicator proposed – the ratio of the 1st and 3rd coefficients of a spectral expansion. The criterion for diagnosing the breakage is the excess of this ratio over the ratio resulting from self-training of a machine.*

Conclusion. *The method proposed for failure diagnosis of cutters of the longitudinally rotating cutting head in real-time based on the spectral expansion of the motor current in the cutting unit. The diagnosed parameter is the ratio of the coefficients of the spectral expansion, corresponding to the frequency of crown rotation and its tripled value.*

Keywords: *heading machine, cutting unit, cutting tool, diagnosis.*

Сведения об авторах

О.Е. Шабаев
SPIN-код: 1447-2343
ORCID iD: 0000-0002-0845-7449
Телефон: +380 (95) 429-13-32
Эл. почта: oeshabaev@yandex.ru

И.И. Бридун
SPIN-код: 4856-8561
ORCID iD: 0000-0002-3199-8518
Телефон: +380 (95) 335-64-68
Эл. почта: ss13835@yandex.ru

Статья поступила 25.12.2017 г.
© О.Е. Шабаев, И.И. Бридун, 2017
Рецензент д.т.н., проф. А.П. Кононенко



УДК 546.722’723+546.87+546.882

И.А. Удодов /к.х.н./, Н.А. Спиридонов, В.М. Погибко /к.х.н./
ГУ «НИИ «Реактивэлектрон» (Донецк)
В.В. Приседский /д.х.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

СИНТЕЗ МУЛЬТИФЕРРОИКОВ $PbFe_{0,5}Nb_{0,5}O_3$–$BiFeO_3$ В СРЕДАХ С КОНТРОЛИРУЕМЫМ ДАВЛЕНИЕМ ПАРА ОКСИДА СВИНЦА

Изучена возможность и найдены условия твердофазного синтеза и спекания мультиферроиков на основе твердых растворов $PbFe_{0,5}Nb_{0,5}O_3$−$BiFeO_3$ (PFN – BFO) в атмосферных тиглях, создающих контролируемое парциальное давление паров оксида свинца. Найдены составы композиций для атмосферных тиглей, представляющие собой инвариантные при данной температуре смеси свинецсодержащих фаз. Показано, что обжиг в атмосферных тиглях позволяет устранить отрицательные последствия высокой летучести оксида свинца и синтезировать однофазные материалы с высокой плотностью и низкой пористостью керамики, с воспроизводимыми электрофизическими свойствами.

Ключевые слова: *мультиферроик. сегнетомагнетик, феррониобат свинца, феррит висмута, твердофазный синтез, спекание, атмосфера синтеза.*

Постановка проблемы

Одним из приоритетов в развитии современной электроники является создание принципиально новых устройств на основе мультиферроиков − функциональных материалов, в которых сосуществуют несколько видов упорядочений, таких как ферромагнитное, сегнетоэлектрическое или сегнетоэластичное [1,2]. Перспективными сегнетомагнетиками (мультиферроики второго порядка с магнитным и сегнетоэлектрическим упорядочением) являются феррониобат свинца $PbFe_{0,5}Nb_{0,5}O_3$ (PFN), феррит висмута $BiFeO_3$ (BFO) и их твердые растворы. Они обладают наиболее высокими температурами ферромагнитного и сегнетоэлектрического фазовых переходов, что позволяет при достаточно высоких рабочих температурах с помощью электрического поля управлять магнитными свойствами, а посредством магнитного поля – электрическими (магнитоэлектрический эффект). Магнитоэлектрический эффект находит применение в разработках принципиально новых спинтронных устройств, в том числе компьютерной памяти (как долговременной, так и оперативной), а также сверхчувствительных датчиков постоянных и переменных магнитных полей различного назначения (медицина, навигация, приборостроение), фазовращателей и переключающих элементов в оптике, устройств для аккумулирования энергии магнитных полей, прецизионных устройств СВЧ-техники и других.

Большой интерес вызвало открытие в тонких (50-500 нм) пленках $BiFeO_3$ гигантского линейного магнитоэлектрического эффекта [3], на несколько порядков величины превосходящего эффекты в других известных материалах. В последнее время исследователи из МФТИ нашли теоретическое объяснение и предложили пути усиления этого эффекта [4].

Для практических применений магнитоэлектрического эффекта используются объемные керамические (поликристаллические) изделия и тонкие пленки. В обоих случаях широкому промышленному применению препятствует низкая технологичность изделий. Высокая летучесть оксида свинца, а также наличие в обеих системах легкоплавких эвтектик приводят к образованию при спекании крупных и трудно зарастающих пор. К тому же феррит висмута (BFO) неустойчив при температурах синтеза [5,6], а синтез феррониобата свинца (PFN) протекает через множество промежуточных продуктов [7]. Синтез однофазных материалов на основе PFN, BFO и их твердых растворов, а также получение достаточно плотных керамических изделий остается нерешенной технологической проблемой.

Анализ последних исследований и публикаций

Во многих работах показано, что при твердофазном синтезе BFO из оксидов Fe_2O_3 и Bi_2O_3 не удается получить однофазные материалы, применяя такие технологические приемы, как сложные, длительные режимы термообработки, многократные промежуточные помолы шихты [8-11]. Использование золь-гель технологии и гидротермального синтеза также не приводят к получению однофазного $BiFeO_3$ [11,12]. Спека-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

нием феррита висмута на воздухе (830-870 °С в течение 2-3 ч) получают керамику с низкой плотностью, не выше 84-90 % от теоретической [5,10,13].

Синтез $PbFe_{0,5}Nb_{0,5}O_3$ сопровождается образованием стабильных промежуточных фаз $Pb_2Fe_{10}O_{17}$, $PbFe_{10}O_{16}$ и $Pb_5Fe_4Nb_4O_{21}$ [7]. Для завершения реакции требуется дальнейшее повышение температуры. Однако выше 1000 °С летучесть паров PbO уже достаточно высока, что приводит к нарушению стехиометрии и неполному превращению промежуточных фаз в $PbFe_{0,5}Nb_{0,5}O_3$. При температурах спекания на воздухе (1050-1100 °С) летучесть PbO приводит к значительной пористости и низкой плотности керамики [5,6]. Для увеличения плотности керамики и повышения электрофизических свойств в шихту вводят легкоплавкую добавку в виде карбоната лития или оксид марганца (IV). Но и в этом случае относительная плотность керамики не превышает 90-95 % [5,6]. Увеличение температур синтеза выше 900 °С и высокие температуры спекания требуют для подавления летучести PbO разработки методов регулирования парциального давления оксида свинца в газовой фазе [13] при синтезе и спекании $PbFe_{0,5}Nb_{0,5}O_3$.

Электрофизические и магнитные свойства $PbFe_{0,5}Nb_{0,5}O_3$ существенно зависят от условий газотермической обработки при синтезе и спекании образцов [14]. Температура Нееля в зависимости от условий получения может изменяться в пределах от 140 до 170 *K*, а температура Кюри от 368 до 385 *K* [4,15]. Для преодоления этого недостатка используют частичное замещение Bi на La и другие редкоземельные элементы [5,16]. Для многих применений проблему представляет высокая электрическая проводимость как BFO, так и PFN. Рентгеноэлектронные спектры обнаруживают в мультиферроиках $PbFe_{0,5}Nb_{0,5}O_3$ и $BiFeO_3$ ионы двухвалентного железа Fe^{2+} [17-19]. Установлено, что электропроводность $PbFe_{0,5}Nb_{0,5}O_3$ существенно зависит от парциального давления кислорода в газовой среде при синтезе [20].

Таким образом, решение проблемы получения качественных изделий (однофазных и низкопористых) из мультиферроиков на основе BFO и PFN связано с необходимостью контроля летучих компонентов в газовой фазе, прежде всего оксида свинца.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является исследование условий твердофазного синтеза и спекания мультиферроиков на основе твердых растворов $PbFe_{0,5}Nb_{0,5}O_3$ − $BiFeO_3$ в средах с контролируемым парциальным давлением паров оксида свинца, обеспечивающих однофазность, низкую пористость керамики, высокие и воспроизводимые электрофизические свойства.

Основной материал исследования

Объектами исследования выбраны твердые растворы феррита висмута и ферониобата свинца состава $(1–x)Bi_{0,90}La_{0,10}Fe_{1,00}O_3–xPbFe_{0,5}Nb_{0,5}O_3$ (BFO – PFN), где x=0,28; 0,30; 0,32; 0,34 и 0,38. Висмут частично (10 %) замещен на лантан для снижения электропроводности и улучшения других свойств. Выбранный диапазон составов включает область $0,325<x<0,40$ морфотропного (ромбоэдрический – кубический перовскит) фазового перехода [5]. Эта область составов представляет особый интерес, т.к. здесь одновременно проявляются не только сегнетоэлектрическое и магнитное упорядочение, но и выраженные пьезоэлектрические свойства [5].

В качестве исходных реагентов при синтезе использовали оксиды реактивной квалификации PbO, Fe_2O_3, Bi_2O_3, La_2O_3 и Nb_2O_5. Выбор максимальной температуры обжига при твердофазном синтезе проводили в интервале 700-1000ºС по данным рентгенофазового (РФА) и термогравиметрического (ТГ) анализов. Найдено, что однофазные твердые растворы $(1–x)Bi_{0,90}La_{0,10}Fe_{1,00}O_3–xPbFe_{0,5}Nb_{0,5}O_3$ (BFO – PFN) синтезируются при 900 °С в течение 10 ч.

Приготовление пресс-порошка проводили смешиванием синтезированного материала со связкой – 5 %-ным водным раствором поливинилового спирта (ПВС) с добавлением глицерина. Для определения температурного режима выжигания связки проводили термогравиметрические исследования с целью определения интервала температур, при которых происходит наиболее сильное газовыделение (рис. 1).

Наиболее интенсивное газовыделение происходит при температурах от 120 до 430 °С. При 120-180 °С испаряется глицерин. В дальнейшем,

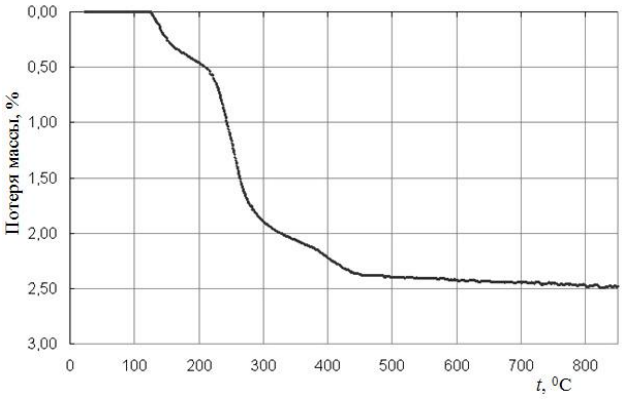


Рис. 1. Кривые потери массы при выжигании связки из воздушно сухого пресс-порошка

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

выше 210 °С происходит ступенчатое разложение ПВС, конечным продуктом которого является элементарный углерод. Выжигание углерода происходит при температурах выше 450 °С и заканчивается при температуре 820 °С. В соответствии с полученными данными, для исключения разрыхления прессовок вследствие газовыделения, скорость подъема температуры при выжигании связки при температурах ниже 450 °С устанавливали не выше 5°С/мин.

Спекание достаточно плотных керамических образцов мультиферроиков требует обжига при более высоких температурах (выше 1000 °С), при которых оксид свинца плавится и достаточно легко испаряется. Летучесть PbO приводит к неконтролируемому сдвигу химического состава и высокой пористости изделий. Авторы изучили возможность преодоления этих затруднений путем применения техники атмосферных тиглей, создающих контролируемое давление пара PbO [21].

Атмосферные тигли позволяют поддерживать постоянное давление пара оксида свинца при данной температуре. Для этого удобно использовать инвариантные (в смысле правила фаз) составы в псевдобинарных разрезах свинецсодержащих систем, проходящих через точку PbO. В качестве примера на рис. 2 показан изотермичесий (*T=const*) разрез в системе PbO – BO_2 с оксидом четырехвалентного элемента B.

В разрезе наблюдаются горизонтальные участки (точки A и B) с постоянной активностью и давлением пара PbO и наклонные (например, в точке C), где давление зависит от состава. В точке A в равновесии находятся три фазы (Φ=3): газообразный $PbO_{(г)}$, жидкий $PbO_{(ж)}$ и промежуточное соединение PbO и BO_2. Три фазы находятся в равновесии и в точке B, где вместо $PbO_{(ж)}$ присутствует BO_2.

Для бинарного разреза (K=2) и в соответствии с правилом фаз Гиббса в точках A или B в областях I и III при *T=const* система инвариантна:

$$f=K-\Phi+1=2-3+1=0.$$

Инвариантность означает, что давление PbO не зависит от состава и, таким образом, смеси двух конденсированных фаз, как в точках A, так и B, обладают определенной буферной емкостью, т.е. способностью отдавать или принимать некоторое количество PbO, сохраняя постоянное давление оксида свинца. В первом случае (A) буферные смеси создают давление PbO максимальное, а во втором (B) – минимальное для промежуточного соединения (двойного оксида) в системе.

В качестве буферных смесей – композиций для атмосферного тигля – подобрали смеси, содержащие твердые растворы цирконата-титаната свинца (ЦТС). Как показано на рис. 3, изменяя соотношение Zr/Ti, можно перекрывать достаточно широкие интервалы равновесных давлений PbO [21]. Смеси ЦТС с избытком PbO (1) и, с другой стороны, с избытком $(Ti,Zr)O_2$ позволяют перекрывать два интервала парциальных давлений PbO.

Схема установки образцов при спекании в атмосферном тигле приведена на рис. 4.

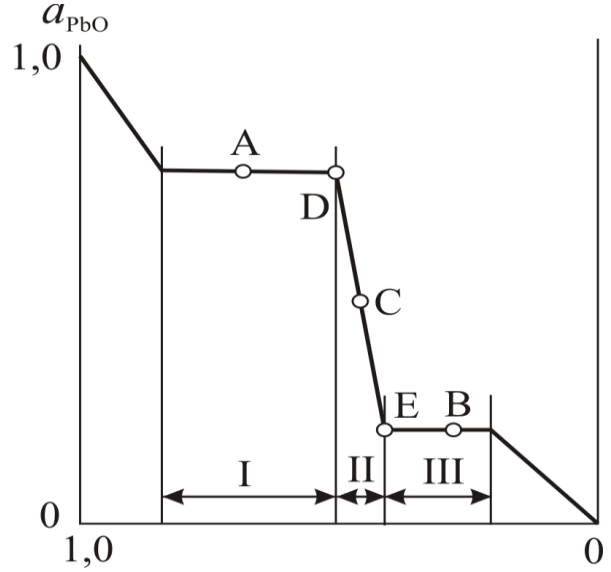


Рис. 2. Схематическая зависимость активности PbO от его мольной доли в бинарном разрезе PbO – BO_2

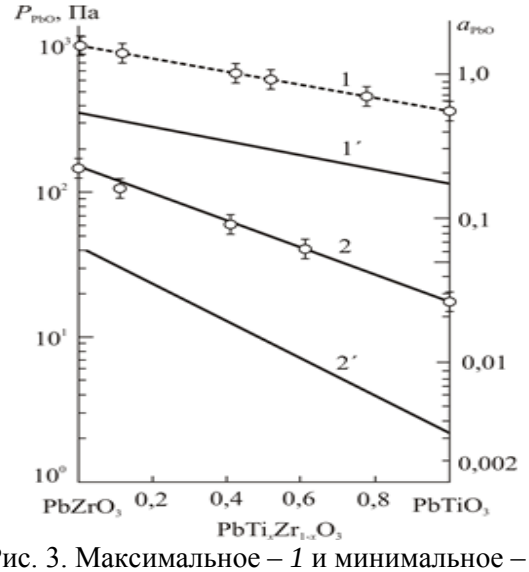


Рис. 3. Максимальное – *1* и минимальное – *2* давление пара PbO над цирконатом-титанатом свинца при 1100 °С [21]; *1* и *2* – общее; *1'* и *2'* – мономерные молекулы PbO

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

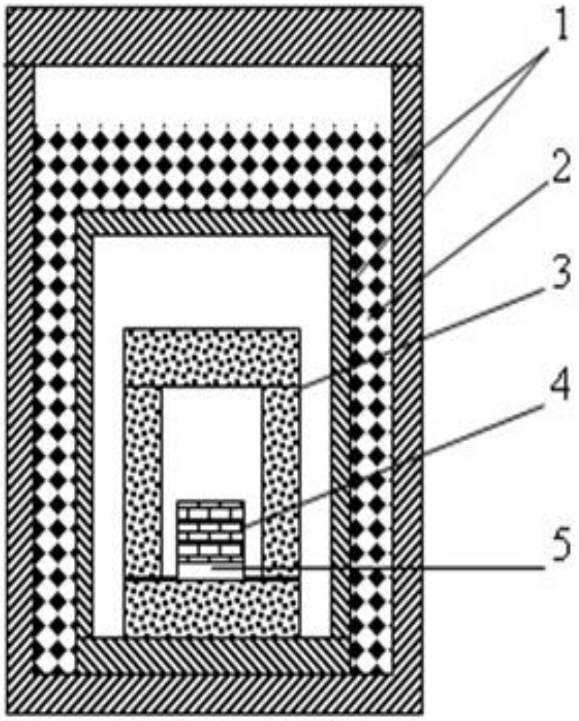


Рис. 4. Упаковка образцов в атмосферном тигле:
1 – алундовые тигли; *2* – засыпка;
3 – атмосферный тигель; *4* – образцы;
5 – платиновая подложка

В табл. 1 представлены результаты исследований спекания образцов твердых растворов BFO – PFN (x=0,30 и 0,36) при спекании при разных температурах и в атмосферных тиглях разного состава. Использованные инвариантные смеси перекрывали диапазон активностей a(PbO) от 0,06 до 0,40 (см. рис. 3).

Табл. 1. Результаты исследования спекания образцов BFO – PFN в атмосферных тиглях разного состава

Состав атмосферного тигля	T обжига, °С (время 2 ч)	Изменение массы (%) при обжиге твердого раствора состава x	
		x=0,36	x=0,30
$PbZrO_3 + ZrO_2$	1050	- 1,5	- 1,6
$PbTiO_3 + PbO$	1050	- 0,2	- 0,4
$PbTi_{0,5}Zr_{0,5}O_3 + PbO$	1050	- 0,08	+ 0,02
$PbZrO_3 + PbO$	1050	+ 0,5	+ 0,4
$PbTi_{0,5}Zr_{0,5}O_3 + PbO$	1020	- 0,03	- 0,01
$PbTi_{0,5}Zr_{0,5}O_3 + PbO$	1075	+ 0,04	- 0,05

Как видно из таблицы, оптимальные результаты по изменению масс образцов при спекании получены в тигле состава $PbTi_{0,5}Zr_{0,5}O_3$: + 0,10 PbO. В атмосфере этого тигля (a(PbO)=0,25) изменение массы образцов при обжиге не превышает нескольких сотых процента. Измерения плотности и изменений массы образцов позволили определить оптимальный термический режим обжига спекания: 1050 °С в течение 2 ч.

Рентгенофазовый анализ спеченных образцов твердых растворов мультиферроиков показывает их высокую степень кристалличности в структурном типе перовскита (рис. 5).

Все образцы однофазны, при температуре спекания следы термического разложения синтезированных при 900 °С твердых растворов не обнаружены.

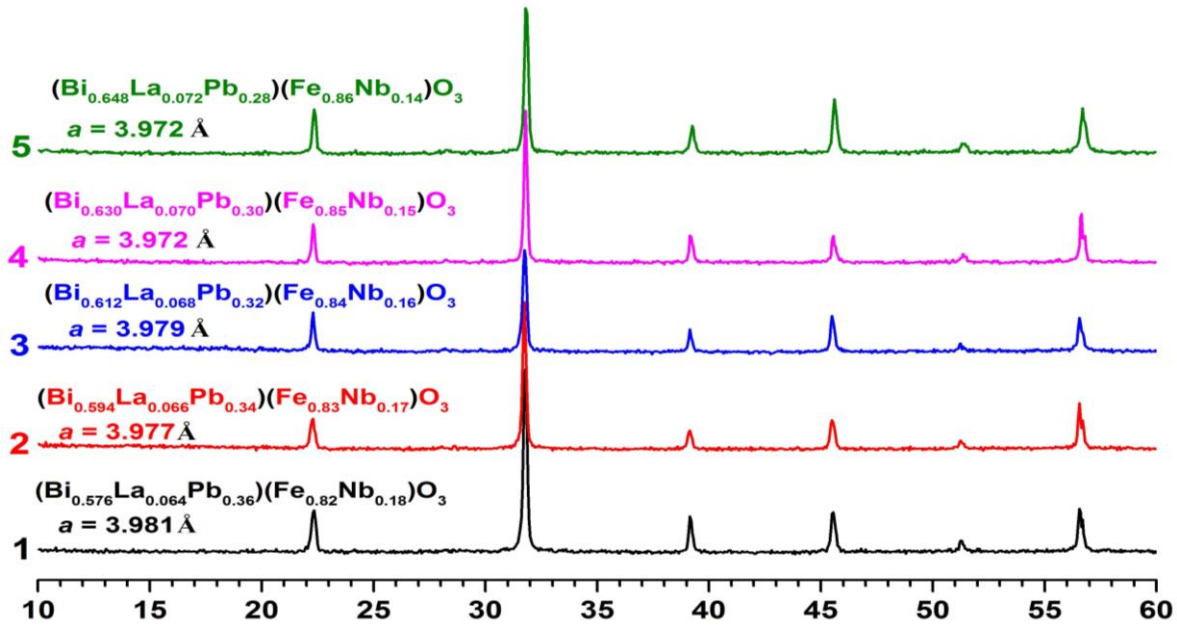


Рис. 5. Рентгеновские дифрактограммы твердых растворов $(1\text{-}x)Bi_{0,90}La_{0,10}Fe_{1,00}O_3 - xPbFe_{0,5}Nb_{0,5}O_3$, x=0,36 – *1*; 0,34 – *2*; 0,32 – *3*; 0,30 – *4*; 0,28 – *5*, спеченных при 1050 °С

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Табл. 2. Параметры элементарной ячейки и плотность спеченных образцов твердых растворов $(1\text{-}x)Bi_{0,90}La_{0,10}Fe_{1,00}O_3 - xPbFe_{0,5}Nb_{0,5}O_3$

x	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36
a, Å	3,972	3,973	3,979	3,977	3,982
V, Å^3	62,680	62,689	63,014	62,918	63,117
$\rho_{рентг.}$, *г/см*^{3}	8,256	8,268	8,239	8,265	8,253
$\rho_{гидр.}$, *г/см*^{3}	8,070	8,040	8,100	7,860	8,150
$\rho_{отн.}$, %	97,746	97,237	98,310	95,097	98,757

Табл. 3. Электрофизические свойства керамических образцов $(1\text{-}x)Bi_{0,90}La_{0,10}Fe_{1,00}O_3$ — $xPbFe_{0,5}Nb_{0,5}O_3$

x	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36
Диэлектрическая проницаемость $\varepsilon/\varepsilon^0$	380±6	307±16	387±5	387±17	403±15
Диэлектрические потери tgδ, %	2,7-3,1	1,8-1,9	1,7-1,9	1,8-2,2	1,8-2,5
Температура Кюри T_C, °C					235-240
Температура Нееля T_N, °C					220-225

Измеренные величины параметра и объема элементарной ячейки приведены в табл. 2. Величина параметра решетки перовскитовой фазы показывает тенденцию к росту с увеличением содержания ферониобата свинца x. В табл. 2 показаны также результаты измерений плотности спеченных образцов: рентгеновской $\rho_{рентг.}$, гидростатической $\rho_{гидр.}$ и относительной $\rho_{отн.}=\rho_{гидр}/\rho_{рентг.}$ Сопоставление полученных данных с данными, приведенными в работе [5], показывает, что спекание свинецсодержащих мультиферроиков в средах с контролируемым давлением PbO позволяет значительно, с 85-90 до 95-98 %, повысить относительную плотность изделий. Это соответствует резкому, в 3-5 раз, снижению остаточной пористости керамики: с 10-15 до 2-5 %.

Высокая однородность и плотность, низкая пористость образцов, спеченных в атмосферных тиглях, приводят к более воспроизводимым и высоким электрофизическим параметрам (табл.3).

Низкая величина диэлектрических потерь свидетельствует о низкой электропроводности керамических образцов и косвенно об их однородности. Измерения диэлектрической проницаемости демонстрируют хорошую воспроизводимость: разброс свойств не превышает 5 %, в то время как на образцах, полученных по обычной технологии, технологическая нестабильность не менее 10-15 % [5,7].

Величины температуры Нееля (T_N=220-225 °C) и Кюри (T_C=235-240 °C), определенные для образцов состава $(Bi_{0,576}La_{0,064}Pb_{0,36})(Fe_{0,82}Nb_{0,18})O_3$ и являющиеся параметрами материала заданного состава, соответствуют результатам определений на качественных образцах других авторов [5,7].

Выводы

Установлено, что синтез и спекание керамических образцов мультиферроиков на основе твердых растворов $PbFe_{0,5}Nb_{0,5}O_3 - BiFeO_3$ в атмосферных тиглях практически исключает неконтролируемые сдвиги состава вследствие летучести PbO при высоких температурах и, тем самым, позволяет синтезировать однофазные материалы этой системы.

Обосновано применение в качестве атмосферосоздающих композиций инвариантных многофазных смесей, включающих сложные (двойные или тройные) свинецсодержащие оксиды. На этой основе выбран состав атмосферного тигля для обжига изучаемых твердых растворов мультиферроиков.

Показано, что спекание в атмосферных тиглях позволяет снизить остаточную пористость керамических мультиферроиков до 2-5 % и получить образцы с воспроизводимыми (не хуже ±5 %) электрофизическими свойствами, диэлектрическими потерями ≤2,5-3 %, температурой Кюри 235-240 °C, температурой Нееля 220-225 °C.

Список литературы

1. Eerenstein, W. Multiferroic and magnetoelectric materials / W. Eerenstein, N. D. Mathur, J. F. Scott // Nature. − 2006. –Vol. 442. – P. 759-765.
2. Scott, J. F. Data Storage: Multiferroic memories / J. F. Scott // Nature Materials. – 2007. – Vol. 6. – P. 256-257.
3. Wang, J. Epitaxial $BiFeO_3$ multiferroic thin film heterostructures. / J. Wang, J. B. Neaton, H. Zheng et al. // Science. – 2003. – Vol. 299. – P. 1719-1722.
4. Popkov, A. F. Origin of the giant linear magnetoelectric effect in perovskitelike multiferroic

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

$BiFeO_3$ / A. F. Popkov, M. D. Davydova, K. A. Zvezdin, S. V. Solov'yov, and A. K. Zvezdin // Physical Review B. – 2016. − Vol. 93: [Electronic resource]. – Access mode: https://doi.org/10.1103/PhysRevB.93.094435

5. Павленко, А.В. Фазовые переходы, пъезо- и магнитодиэлектрические свойства Fe- и Mn-содержащих мультиферроиков: Автореф. дис. … к-та хим. наук: 01.04.07 / Павленко Анатолий Владимирович. – Нальчик, 2012. – 23 с.
6. Павленко, А.В. Диэлектрическая релаксация в керамике $PbFe_{1/2}Nb_{1/2}O_3$. / А.В. Павленко, А.В. Турик, Л.А. Резниченко и др. // Физика твердого тела. – 2011. – Т. 53, № 9. – С. 1773-1776.
7. Карюков, Е.В. Низкотемпературная технология формирования фаз кислородно-октаэдрического типа, содержащих Nb(V), и свойства материалов на их основе: Автореф. дис. … к-та техн. наук: 05.17.01 / Карюков Егор Владимирович.− Ростов-на-Дону, 2010. – 24 с.
8. Azuma, M. Magnetic and structural properties of $BiFe_{1-x}Mn_xO_3$. / M. Azuma, H. Kanda, A.A. Belik et al. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2007. – Vol. 310. – P. 1177-1179.
9. Huo, G.. Phase relations in the Bi_2O_3-Fe_2O_3-MnO_Y system at room temperature. / G. Huo, Zh. Gu, M. Qiu // Journal of Alloys and Compounds. – 2004. – Vol. 381. – P. 317-313.
10. Тесленко, П.Ю. Структурообразование мультиферроиков состава $BiFe_{1-x}Mn_xO_3$ в зависимости от термодинамической предыстории образцов / П.Ю. Тесленко, О.Н. Разумовская, Л.А. Шилкина и др. // Материалы VII междунар. научно-технич. конф. Intermatic, ч.1, 7-11.12.2009, Москва. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – С. 161-165.
11. Carvalho, T.T. Synthesis and thermodynamic stability of multiferroic $BiFeO_3$ / T.T. Carvalho, P.B. Tavares // Materials Letters. – 2008. – Vol. 62. – P. 3984-3986.
12. Chen, Ch. Hydrothermal synthesis of perovskite bismuth ferrite crystallites / Ch. Chen, Ji. Cheng, Sh. Yu, et al. // Journal of Crystal Growth. – 2006. – Vol. 291. – P. 135-139.
13. Приседский, В.В. P-T-X фазовая диаграмма и парциальные термодинамические свойства кислорода в $LaBa_2Cu_3O_x$ / В.В. Приседский, И.А. Удодов. // Сб. докл. V междунар. научн. конф. «Химич. термодинамика и кинетика», 25-29.05.2015, Вел.Новгород. – Вел. Новгород: Изд.-полиграф. центр Новгородского гос. ун-та, 2015. – С. 179-180.
14. Павленко, А.В. Влияние модифицирования карбонатом лития и оксидом марганца на структуру, микроструктуру и сегнетопьезоэлектрические свойства керамики ферониобата свинца / А.В. Павленко, И. А. Вербенко, С. И. Шевцова и др. // Фазовые переходы, упорядоченные состояния и новые материалы. – 2013. – № 4. – С. 73-81.
15. Wang, J. Epitaxial $BiFeO_3$ multiferroic thin film heterostructures / J. Wang, J. B. Neaton, H. Zheng, et al. // Science. –2003. – Vol. 299. – P. 1719-1722.
16. Gao, F. Preparation of La-doped $BiFeO_3$ thin films with Fe^{2+} ions on Si substrates / F. Gao, C. Cai, Y. Wang, et al. // Journal of Applied Physics. – 2006. – Vol. 99. – P. 094105.
17. Kania, A. X-Ray Photoelectron Spectroscopy, Magnetic and Dielectric Studies of $PbFe_{1/2}Nb_{1/2}O_3$ Single Crystals / A. Kania, E. Talik, M. Kruczek. // Ferroelectrics. – 2009. – Vol. 391, No.1. – P.114-121.
18. Namura, S. PTC effect in $PbFe_{1/2}Nb_{1/2}O_3$ / S. Namura, K. Doi // Japanese Jurnal of Applied Physics. – 1970. – Vol. 9, No. 6. – P. 716.
19. Yang, Y. Magnetoelectric coupling in ferroelectromagnet $Pb(Fe_{1/2}Nb_{1/2})O_3$ single crystals / Y. Yang, J.-M. Liu, H. B. Huang et al. // Physical Review B. – 2004. – Vol. 70. – P. 132101-132104.
20. Амиров, А.А. Особенности тепловых, магнитных и диэлектрических свойств мультиферроиков $BiFeO_3$ и $Bi_{0,95}La_{0,05}FeO_3$ / А.А. Амиров, А.Б. Батдалов, С.Н. Каллаев и др. // Физика твердого тела. – 2009. – Т. 51, № 6. – С. 1123-1126.
21. Приседский, В.В. Нестехиометрические сегнетоэлектрики $A^{II}B^{IV}O_3$ / В.В. Приседский. – Донецк: Ноулидж, 2011. – 267 с.

I.A. Udodov /Cand.Sci. (Chem.)/, N.A. Spiridonov, V.M. Pogibko /Cand.Sci. (Chem.)/
Science-Research Institute «Reaktivelektron» (Donetsk)
V.V. Prisedskiy /Dr.Sci. (Chem.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)

SYNTHESIS OF $PbFe_{0.5}Nb_{0.5}O_3$ – $BiFeO_3$ MULTIFERROICS IN AMBIENT WITH CONTROLLED PRESSURE OF LEAD OXIDE VAPOR

Background. *Multiferroics based on lead ferroniobate $PbFe_{0.5}Nb_{0.5}O_3$ (PFN), bismuth ferrite $BiFeO_3$ (BFO) and their solid solutions are promising for applications in spintronics and other emerging are-*

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

as of modern electronics. However, their synthesis is characterized by low adaptability, uncontrolled changes in the composition, poor reproducibility of properties due to the significant volatility of lead oxide. Therefore, the problem of obtaining high-quality materials on the basis of multiferroics is connected with the need to control the pressure of volatile components in the gas phase during the synthesis and sintering of ceramic products.

Materials and/or methods. *The samples of solid solutions of PFN and BFO obtained from reactive oxides by the method of solid-phase synthesis. X-ray phase analysis is carried out on diffractometer DRON-3 with Cu K_a radiation. Thermogravimetric studies are carried out on the basis of automatic electronic scales RADWAG AS 220C (Poland). Dielectric properties measured by the AC bridge.*

Results. *Experimentally found the compositions of the invariant two-phase mixtures for the atmospheric crucibles, which create at a given temperature the constant vapor pressure of PbO necessary to minimize the loss of PbO during the synthesis and sintering and obtain single-phase materials. Conditions selected for the firing in the atmospheric crucibles, providing the dense, low-porosity ceramic products. X-ray phase analysis showed high crystallinity (perovskite structure) and single-phase samples. The measured electrical properties are characterized by low dielectric losses and high reproducibility.*

Conclusion. *The synthesis and sintering of multiferroics $PbFe_{0.5}Nb_{0.5}O_3 - BiFeO_3$ in the atmospheric crucibles minimize the loss of volatile oxide PbO at high temperatures and allows synthesizing single-phase materials. Application of the invariant multiphase mixtures as a composition for atmospheric crucibles substantiated and selected the composition for the firing of the studied solid solutions: $PbTi_{0.5}Zr_{0.5}O_3$ + 0.10 PbO. Shown that sintering in ambient with controlled vapor pressure of PbO allows reducing the residual porosity of the ceramic multiferroics up to 2-5 % and obtaining samples with reproducible (not worse than ± 5 %) electrophysical properties, dielectric losses equal to 2.5 - 3 %, the Curie temperature of 235 -240 °C and Neel temperature of 220-225 °°C.*

Keywords: *multiferroic, magnetoelectric, lead ferroniobate, bismuth ferrite, solid-state synthesis, sintering, synthesis ambient.*

Сведения об авторах

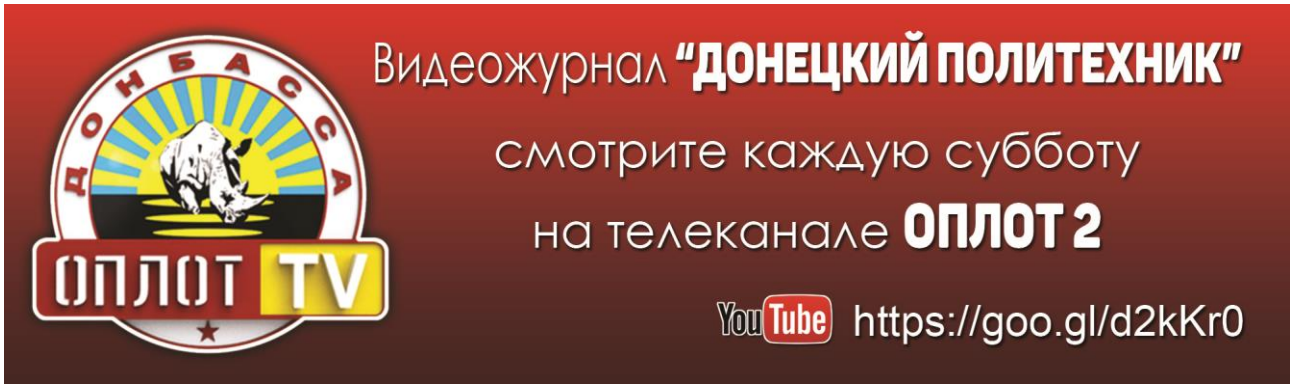
И.А. Удодов
Телефон: +380 (99) 938-08-24
Эл. почта: reaktivelektron@mail.ru

В.М. Погибко
Телефон: +380 (66) 039-18-63
Эл. почта: reaktivelektron@mail.ru

Н.А. Спиридонов
Телефон: +380 (66) 245-04-36
Эл. почта: reaktivelektron@mail.ru

В.В. Приседский
SPIN-код: 8492-4654
Author ID: 6602450219
Researcher ID: A-2081-2016
ORCID iD: 0000-0001-9374-7696
Телефон: +380 (95) 136-33-70
Эл. почта: prisedsky@feht.donntu.org

Статья поступила 22.12.2017 г.
© И.А. Удодов, В.М. Погибко, Н.А. Спиридонов, В.В. Приседский, 2017
Рецензент д.х.н., проф. Ю.Б. Высоцкий



ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

К 90-летию АЛЕКСАНДРА ГЕОРГИЕВИЧА ПОНОМАРЕНКО

1 января 2018 года исполняется 90 лет со дня рождения выдающегося ученого-металлурга, педагога Пономаренко Александра Георгиевича.

Вся его жизнь тесно связана с металлургией. Осенью 1942-го в возрасте 14-ти лет он пошел работать плавильщиком на Актюбинский ферросплавный завод. Сразу после войны, в 1945 году, он поступает в Уральский политехникум на специальность «Электрометаллургия стали и ферросплавов», по окончании которого, в 1949 г., возвращается на завод.

В 1958 году продолжает образование, поступая в Московский институт стали и сплавов (МИСиС) на ту же специальность.

Став инженером, он снова возвращается на завод и вскоре переходит во вновь образованный в г. Челябинске Научно-исследовательский институт металлургии (НИИМ). Уже в 1966 году защищает кандидатскую диссертацию по теме «Исследование явлений стехиометрической разупорядоченности в шлаковых расплавах». Развивая идеи строения шлаковых систем, в 1974 году в Журнале Физической Химии (ЖФХ) Александр Георгиевич публикует статью «Вопросы термодинамики фаз переменного состава, имеющих коллективную электронную систему». В ней он выразил основные идеи своей теории коллективизированных электронов, ставшей известной в дальнейшем также как «метод Пономаренко». В продолжение этой темы в 1978 году Александр Георгиевич защитил докторскую диссертацию под названием «Термодинамика металлургических шлаков с учетом их электронного строения».

С 1980 года Александр Георгиевич Пономаренко работает в ДонНТУ (ДПИ), вначале заведующим кафедрой «Электрометаллургия стали и ферросплавов», а с 1995 года – профессором кафедры «Электрометаллургия», впоследствии кафедры «Металлургия стали и сплавов».

В 1985 году ему присвоено ученое звание профессора.

За годы работы в ДонНТУ проф. А.Г. Пономаренко создал научную школу в области управления технологическими процессами и качеством металлопродукции. Его теория коллективизированных электронов, помимо обеспеченности статистически определяемыми по большому массиву справочных данных энергетическими параметрами, ввиду своей формализации идеально подошла для расчета равновесия в термодинамической системе металл-шлак, а затем и металл-шлак-газ. Кроме того, он теоретически обосновал и практически подтвердил постулат о том, что в области температур сталеварения скорость как отдельной химической реакции, так и процесса в целом определяется исключительно перемешиванием, склонив тем самым чашу весов в давнем споре между кинетикой и термодинамикой в сторону последней.

Еще одним важным аспектом его учения, вытекающим из предложенной модели, является то, что любую конденсированную фазу, в том числе шлаковую, металлическую, жидкую, твердую, следует рассматривать как одну большую молекулу, а ее компонентами могут считаться только реальные частицы – участники теплового движения, т.е. в области металлургии атомы – конечные компоненты по Гиббсу. На основе этих положений и модели равновесного межфазного распределения, используя концепцию так называемых реакционных зон, была построена модель, описывающая неравновесные системы, опирающаяся на совершенно строгие, надежные справочные данные о равновесном состоянии без использования кинетических уравнений.

Эти идеи и модели нашли практическое применение в масштабной работе по изучению и внедрению прямого легирования сталей массового сортамента марганцем непосредственно из марганцевого концентрата, по удалению водорода из металла в процессе электрошлакового переплава. Был теоретически описан и взят под контроль так называемый эффект накачки металла азотом. Разработан метод расчета оптимального набора материалов (минимальной стоимости) с применением методов линейного программирования для нелинейных систем и ряд других направлений.

Перечисленные применения теории оформлялись по мере развития научной школы в пакеты прикладных программ «Форвард», «Оракул», «Гиббс®». Каждый из них вбирал все лучшее из своих предшественников и расширял спектр решаемых задач. В результате была получена система, являющаяся основой промышленной АСУ ТП реальных агрегатов.

Много сил и таланта отдает Александр Георгиевич своим ученикам. Им подготовлены тысячи инженеров, 22 кандидата и 2 доктора наук. Он единоличный автор теории шлаковых расплавов «Модель коллективизированных электронов», известной в металлургическом сообществе как «теория Пономаренко».

Пономаренко Александр Георгиевич, как и прежде, активный ученый и педагог, руководит подготовкой магистрантов и научных работников, является членом диссертационного Совета по защите кандидатских и докторских диссертаций.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, НАПРАВЛЯЕМЫМ В РЕДАКЦИЮ

1. Основной текст статьи должен содержать такие необходимые элементы, выделенные заголовками, как:

– **постановка проблемы** в обобщенном виде и ее связь с важными научными или практическими задачами;

– **анализ последних исследований и публикаций**, в которых начато решение данной проблемы и на которые опираются авторы, выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена данная статья;

– формулировка **цели (задачи) исследования;**

– изложение **основного материала исследования** с полным обоснованием полученных научных результатов;

– **выводы** по данному исследованию и перспективы дальнейшего развития данного направления.

2. Статья, основной текст вместе с рисунками и др. нетекстовыми элементами, должна быть объемом **8…10 полных** страниц формата А4 (210×297 мм) с полями **20** мм с каждой стороны. Рукопись статьи необходимо оформлять с помощью редактора MS Word. Шрифт – Times New Roman, **12** пт, стиль – обычный. Межстрочный интервал – одинарный. Расстановка переносов – автоматическая. Выравнивание – по ширине страницы. Страницы не нумеровать.

3. Структура статьи (каждый элемент с новой строки): код УДК; инициалы и фамилии авторов с указанием ученой степени каждого (количество авторов **не более 3-х** от одной организации); название организации, город, где работают авторы; название статьи; аннотация на русском языке (объемом **не более 300** символов); ключевые слова (**от 3 до 5**); основной текст статьи; список литературы. Сокращение слов в тексте, рисунках и таблицах не допускается.

В аннотации на русском языке сжато излагается формулировка задачи, которая решена в статье, и приводятся полученные основные результаты.

В конце статьи, после списка литературы приводятся инициалы и фамилии авторов, ученые степени, организации, города, название статьи, аннотация и ключевые слова на английском языке

Аннотация на английском языке должна представлять собой резюме, призванное выполнять функцию независимого от статьи источника информации. Резюме должно быть информативным (не содержать общих слов), оригинальным (не являться калькой аннотации на других языках), содержательным (отражать основное содержание статьи и результаты исследований), структурированным (следовать логике описания результатов в статье), компактным, но не коротким (объемом **от 250 до 300** слов). Типичная структура резюме: состояние вопроса (**Background**); материалы и/или методы исследования (**Materials and/or methods**); результаты (**Results**); заключение (**Conclusion**).

Внимание! Убедительная просьба не разбивать текст на колонки, как это сделано в журнале, т.к. это усложняет редакторскую обработку статьи!

4. **Обязательным условием** является наличие в статье графического материала (рисунков, графиков, схем, фотографий), размером **не менее 80×80** мм, в формате *.tif или *.jpg, разрешением **не менее 300** dpi. Графический материал внедренными объектами размещается по тексту после первого упоминания, не разрывая текста абзаца. Все позиции, обозначенные на рисунках, должны быть объяснены в тексте. Под каждым рисунком указывается его порядковый номер и название (выравнивание по центру страницы, без точки в конце). Рисунки должны иметь один интервал (пустую строку) сверху и снизу.

Внимание! Запрещается внедрять графические материалы в виде объектов, связанных с др. программами, например, с КОМПАС, MS Excel и т.п. Рисунки, выполненные непосредственно в MS Word не принимаются.

5. Математические формулы необходимо выполнять с помощью редактора формул **MS Equation Editor 3.0** в соответствии со следующими размерами: обычный символ – **11** пт; крупный индекс – **7** пт; мелкий индекс – **5** пт; крупный символ – **13** пт; мелкий символ – **8** пт.

Все величины, входящие в формулы, должны быть объяснены в тексте. Формулы должны иметь один интервал (пустую строку) сверху и снизу. Формулы выполняются курсивом, **кроме цифр и символов греческого алфавита**. Формулы нумеруются (справа в круглых скобках, не отступая от формулы) **только в том случае**, если в тексте на них имеются ссылки.

Внимание! Количество формул в статье **не более 5**. Запрещается выполнять формулы с помощью MathCAD или др. аналогичных программ.

6. Таблицы должны иметь порядковый номер и название (выравнивание по центру страницы, без точки в конце) и располагаться по тексту после первого упоминания, не разрывая текста абзаца. Таблицы должны иметь один интервал (пустую строку) сверху и снизу.

7. **Обязательным условием** является наличие в статье списка литературы, который приводится после выводов через один интервал (пустую строку) под заголовком **Список литературы**. Перечень ссылок должен быть составлен в порядке упоминания в тексте. Ссылки на литературу по тексту заключаются в квадратные скобки. В списке литературы должно быть **не менее 3-х** публикаций, вышедших **за последние 5** лет, а также **не менее 3-х** зарубежных (англоязычных) публикаций.

Для принятия решения о публикации статьи в журнале, в адрес редакции необходимо выслать:

– сопроводительное письмо (с указанием, что статья ранее нигде не публиковалась) от организации, где работают авторы и сведения об авторах статьи;

– электронный вариант статьи (имя файла составляется из фамилий авторов, например, ИвановПетров.doc) и сведений об авторах (имя файла – ИвановПетров_sved.doc).

В сведениях об авторах для каждого соавтора обязательно должен быть указан адрес персональной эл. почты.

Для ускорения подготовки очередных номеров журнала, просьба передавать сопроводительное письмо в отсканированном виде, электронный вариант статьи и сведения об авторах по эл. почте на адрес: **vestnikdonntu@gmail.com**

Внимание! Убедительная просьба, проверить получение редакцией материалов любым из способов (по телефонам **+380 (66) 176-72-65, +380 (62) 301-07-89** или эл. почте).

Редакция оставляет за собой право возвращать статьи авторам на доработку в следующих случаях: статья небрежно оформлена и не соответствует требованиям редакции журнала, приведенным выше; статья требует доработки в соответствии с замечаниями рецензента и редакторов; отсутствует сопроводительное письмо от организации, где работают авторы или сведения об авторах.

Требования к рекламно-информационным материалам, публикация которых оплачивается, согласовываются непосредственно с редакцией журнала.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org