



Серия 1. Машиностроение

Series 1. Mechanical Engineering

Издается с января 2002 года

Published since January 2002

Периодичность издания – один раз в два месяца

Publication frequency – bi-monthly

Учредитель

Белорусский национальный
технический университет

Founder

Belarusian National
Technical University

Главный редактор

Борис Михайлович Хрусталеv

Editor-in-Chief

Boris M. Khroustalev

Редакционная коллегия

А. С. Калиниченко (*заместитель главного редактора*),
В. В. Бабицкий, В. Г. Баштовой, А. В. Белый, В. П. Бойков,
С. В. Босаков, Ю. В. Василевич, О. Г. Девойно,
К. В. Доброго, П. И. Дячек, М. З. Згуровский (*Украина*),
Р. Б. Ивуть, М. Г. Киселев, В. М. Константинов, Я. Н. Ковалев,
В. В. Козловский, Н. В. Кулешов, С. Н. Леонович,
С. А. Маскевич, Э. И. Михневич,
Нгуен Тху Нга (*Вьетнам*), М. Опеляк (*Польша*),
О. Г. Пенязьков, Г. А. Потаев, О. П. Реут, Ф. А. Романюк,
И. И. Сергей, В. Л. Соломахо, С. А. Чижик, А. Н. Чичко,
В. К. Шелег, Й. Эберхардштайнер (*Австрия*),
Б. А. Якимович (*Россия*)

Editorial Board

A. S. Kalinichenko (*Deputy Editor-in-Chief*),
V. V. Babitsky, V. G. Bashtovoi, A. V. Belyi, V. P. Boikov,
S. V. Bosakov, Yu. V. Vasilevich, O. G. Devoyno,
K. V. Dobrego, P. I. Diachek, M. Z. Zgurovsky (*Ukraine*),
R. B. Ivut, M. G. Kiselev, V. M. Konstantinov, Ya. N. Kovalev,
V. V. Kozlovsky, N. V. Kuleshov, S. N. Leonovich,
S. A. Maskevich, E. I. Mikhnevich,
Nguyen Thuy Nga (*Vietnam*), M. Opelyak (*Poland*),
O. G. Peniazkov, G. A. Potaev, O. P. Reut, F. A. Romaniuk,
I. I. Sergei, V. L. Solomakho, S. A. Chizhik, A. N. Chichko,
V. K. Sheleg, J. Eberhardsteiner (*Austria*),
B. A. Yakimovich (*Russia*)

СОДЕРЖАНИЕ

Машиностроение

Качанов И. В., Шарий В. Н., Власов В. В. Ресурсосберегающая технология скоростного горячего выдавливания биметаллического стержневого инструмента ...	3
Иванов В. П. Выбор способа восстановления деталей	9
Ровин С. Л. Исследование работы ротационных наклоняющихся плавильных печей	18
Жданович Ч. И., Калинин Н. В. Определение передаточных отношений механической части электромеханической трансмиссии трактора	29
Михайлов В. В., Снитков А. Г., Ляхов С. В. Повышение эксплуатационных показателей автобуса путем интегрированного управления подвеской и трансмиссией	37
Дьяченко О. В., Кардаполова М. А., Маркевич Н. Ю. Структурообразование сплавов на железной основе после лазерного легирования	46

CONTENTS

Mechanical Engineering

Kachanov I. V., Shary V. N., Vlasov V. V. Resource-Saving Technology for High-Speed Hot Extrusion of Bimetallic Rod Parts	3
Ivanov V. P. Selection of Method for Restoration of Parts	9
Rovin S. L. Investigations on Operation of Rotary Tilting Furnaces	18
Zhdanovich Ch. I., Kalinin N. V. Determination of Transmission Gear Ratio in Mechanical Part of Tractor Electro-Mechanical Transmission	29
Mikhailau V. V., Snitkov A. G., Liahov S. V. Improvement of Bus Operational Characteristics While Using Integrated Control of Suspension and Transmission	37
Diachenko O. V., Kardapolova M. A., Markevich N. Yu. Structure Formation of Alloys on Iron Basis after Laser Alloying	46

Содержание

Лагереv Р. Ю., Капский Д. В. Снижение вероятности образования транспортных заторов на дорогах высших категорий управлением доступом к сети	52	Lagerev R. Yu., Kapsky D. V. Reduction in Probability of Traffic Congestion on High-Class Road Using Ramp Access Control	52
Алексеев Ю. Г., Королёв А. Ю., Нисс В. С., Паршута А. Э. Электролитно-плазменная обработка внутренних поверхностей трубчатых изделий	61	Alekseev Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S., Parshuta A. E. Electrolytic-Plasma Treatment of Inner Surface of Tubular Products	61
Котлобай А. Я., Котлобай А. А., Тамело В. Ф. Гидравлические агрегаты систем приводов ходового оборудования дорожно-строительных машин	69	Kotlobai A. Ja., Kotlobai A. A., Tamelo V. F. Hydraulic Units for Driving Systems of Running Equipment in Road Construction Machinery	69
Кульбашная Н. И. Энтропийные характеристики в моделях согласования смежных участков дорог	78	Kulbashnay N. I. Entropy Characteristics in Models for Coordination of Neighboring Road Sections	78

Ответственный секретарь редакции

В. Н. Гурьянчик

Executive Secretary of Editorial Staff

V. N. Guryanchyk

Адрес редакции

Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 65, корп. 2, комн. 327
220013, г. Минск, Республика Беларусь

Тел. +375 17 292-65-14

E-mail: sat@bntu.by

Address

Belarusian National Technical University
Nezavisimosty Avenue, 65, Building 2, Room 327
220013, Minsk, Republic of Belarus

Tel. +375 17 292-65-14

E-mail: sat@bntu.by

Перерегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 19 декабря 2011 г.
Регистрационный номер 285

С 2002 г. издание выходило под названием «Вестник БНТУ»

ISSN 2227-1031. Подписные индексы 00662, 006622

Подписано в печать 19.01.2016. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.
Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 250 экз. Дата выхода в свет . Заказ № .

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 02330/74 от 03.03.2014.
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

© «Наука и техника», 2016

УДК 621.7.044

Ресурсосберегающая технология скоростного горячего выдавливания биметаллического стержневого инструмента

Докт. техн. наук, проф. И. В. Качанов¹⁾, канд. техн. наук, доц. В. Н. Шарий¹⁾,
асп. В. В. Власов¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Процессы скоростного формоизменения, особенно скоростного горячего выдавливания, создают эффективные условия для обработки малопластичных и труднодеформируемых материалов, широко используемых в инструментальном производстве. В связи с тем что высокоскоростная штамповка обеспечивает получение точных заготовок с повышенными механическими свойствами, она может быть использована как технологический процесс изготовления стержневых деталей штамповой оснастки, работающих в условиях повышенных нагрузок и износа. Целью данной работы являлись экспериментальные исследования возможности получения биметаллического стержневого инструмента, основой которого служат конструкционные стали, а рабочую часть выполняют из высоколегированных инструментальных сталей с экономией последних до 90 %. Разработаны схема нагружения и геометрия сопрягаемых поверхностей составной заготовки. Отработана экспериментальная технология получения биметаллических стержневых деталей штамповой оснастки при деформировании со скоростью $v_d = 70\text{--}80$ м/с и температуре составной заготовки $T = (1150 \pm 20)^\circ\text{C}$, с формированием соединения при совместном пластическом течении на поверхности контакта двух частей заготовки с удалением поверхностных оксидных пленок. Исследованы микроструктуры полученных скоростным горячим выдавливанием биметаллических соединений для композиций на основе конструкционной и высоколегированных сталей, подтверждено их высокое качество. Установлены зависимости распределения микротвердости в направлении от плоскости контакта двух сталей в зоне соединения, характеризующиеся минимальным значением микротвердости на стыке полученного соединения. Наличие более пластичной области в плоскости контакта способствует снижению остаточных напряжений вследствие их релаксации в этой области и повышению прочности соединения.

Ключевые слова: биметаллические стержневые детали, штамповая оснастка, метод скоростного горячего выдавливания

Для цитирования: Качанов, И. В. Ресурсосберегающая технология скоростного горячего выдавливания биметаллического стержневого инструмента / И. В. Качанов, В. Н. Шарий, В. В. Власов // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 1. С. 3–8

Resource-Saving Technology for High-Speed Hot Extrusion of Bimetallic Rod Parts

I. V. Kachanov¹⁾, V. N. Sharyi¹⁾, V. V. Vlasov¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Processes of high-speed shaping changes and especially high-speed hot extrusion create efficient conditions for treatment of weakly plastic and poorly deformable materials which are widely used in tool making facilities. Due to the fact that high-speed stamping provides accurate billets with increased mechanical properties, it can be used as a technological

Адрес для переписки

Власов Вячеслав Владимирович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-76-77
hidrokaf@bntu.by

Address for correspondence

Vlasov Viacheslav V.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosti Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-76-77
hidrokaf@bntu.by

process for manufacturing rod parts of die tooling operating under conditions of increased loads and wear. The purpose of the given paper is to carry out experimental investigations on the possibility to obtain a bimetallic rod tool where structural steel is considered as a basis of the tool and a working cavity is made of high-alloyed tool steel with its saving up to 90 %. A scheme of loading and geometry of conjugated surfaces of the composite billet have been developed in the paper. Technology for obtaining bimetallic rod parts of die tooling with deformation at speed of $v_d = 70\text{--}80$ m/s and composite billet temperature of $T = (1150 \pm 20)$ °C has been experimentally tested with formation of a compound due to plastic flow of two billet parts on contact surface with removal of surface oxide films. Microstructures of the bimetallic compounds obtained with the help of high-speed hot extrusion method for compositions of structural and high-alloy steels have been investigated and their high quality has been proved during the investigations. Dependences of micro-hardness distribution have been established outbound two steel contact plane in the zone of connection that are characterized by a minimum micro-hardness value in the connection joint. Availability of more plastic zone in the contact plane contributes to reduction of residual stresses due to their relaxation in this zone and higher joint strength.

Keywords: bimetallic rod parts, die tooling facilities, high-speed hot extrusion method

For citation: Kachanov I. V., Shary V. N., Vlasov V. V. (2016) Resource-Saving Technology for High-Speed Hot Extrusion of Bimetallic Rod Parts. *Science & Technique*. 15 (1), 3–8 (in Russian)

Введение

В настоящее время в Республике Беларусь остро стоит вопрос создания современных, оснащенных прогрессивными техпроцессами и оборудованием, специализированных предприятий по проектированию и изготовлению высококачественной технологической оснастки и инструмента. Как показывает мировой промышленный опыт, машиностроительным предприятиям необходимо применять инструмент, штампы и пресс-формы качеством на порядок выше, чем выпускаемая продукция. Это связано с усложнением производимой продукции и сокращением ее жизненного цикла в соответствии с требованиями рынка.

Благодаря ряду преимуществ (адиабатные условия протекания процесса, снижение контактного трения, благоприятное действие сил инерции, способствующие лучшему заполнению матричной полости, и т. д.) процессы скоростного формоизменения, особенно скоростного горячего выдавливания (СГВ), создают эффективные условия для обработки малопластичных и труднодеформируемых материалов, широко используемых в инструментальном производстве [1–4]. В связи с тем что высокоскоростная штамповка обеспечивает получение точных заготовок с повышенными механическими свойствами, она может быть использована как технологический процесс изготовления стержневых деталей штамповой оснастки [1–4].

Цель работы – исследование возможности получения путем СГВ биметаллического инструмента, основой которого служат конструк-

ционные стали, а рабочую часть выполняют из высоколегированных штамповых сталей с экономией последних до 90 %.

Технология получения деталей

Для проведения исследований были выбраны представители штамповых сталей 5ХНМ и 45Х3ВЗМФС (ДИ23), широко используемых для изготовления стержневых деталей кузнечных штампов в инструментальном производстве. В качестве материала основы взята легированная конструкционная сталь 40Х.

Для экспериментального исследования процесса и отработки технологии использовали высокоскоростную установку горизонтального типа, конструктивная схема которой показана на рис. 1 [1–3, 5]. Установка состоит из рамы 1, с одной стороны которой жестко закреплен ствол 2 с энергоузлом 3, а с другой – сборный шабот 4. На шаботе в регулируемых направляющих 5 и упорах 6 смонтирован выдвижной переходник 7 для крепления штампа. Изменение положения переходника по высоте осуществляется винтом 8. Для снижения уровня шума установка оснащена съемным глушителем 9, для обеспечения безопасных условий труда – ловителем 10. Пуансон 11 за счет сгорания энергоносителя в энергоузле имеет возможность разогнаться в стволе до скорости $v_0 = 150\text{--}200$ м/с. Разгон пуансонов с массой $M_n = 8\text{--}12$ кг до указанных скоростей обеспечивал придание им энергии $E_0 = 100\text{--}200$ кДж, вполне достаточной для скоростного выдавливания практически любой стержневой детали штамповой оснастки.

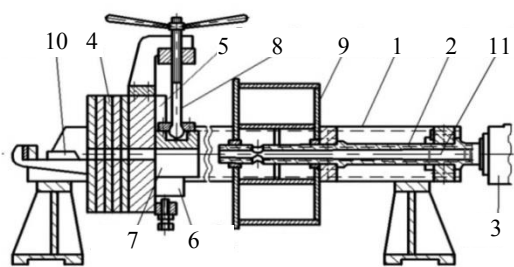


Рис. 1. Конструктивная схема горизонтальной установки

Fig. 1. Structural diagram of horizontal installation

Для проведения исследований и отработки технологии выбрали деталь штампа пуансон (рис. 2) из номенклатуры инструментального производства ОАО «МАЗ». Деталь пуансон используется в штампе для высадки на горизонтально-ковочной машине ГКМ-100, поковок типа ключ.

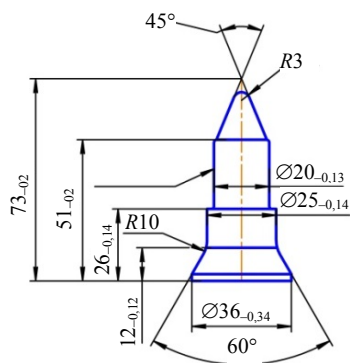


Рис. 2. Чертеж детали пуансон № 9783-433.09 из номенклатуры инструментального производства ОАО «МАЗ»

Fig. 2. Drawing of punch item No 9783-433.09 from range of tool-making facilities of JSC "MAZ"

Для получения детали пуансон из разнородных металлов (ДИ23 + 40Х, 5ХНМ + 40Х) разработали экспериментальную оснастку (рис. 3), в состав которой входили: комплект из двух полуматриц типов 1 или 2, основной ударник и промежуточный боек, которые позволяли осуществлять пластическое формообразование из биметаллической заготовки детали пуансон полностью в полуматрицах 2 либо частично в полуматрицах 1 с дополнительным использованием наковальни.

Заготовку для получения биметаллической детали пуансон делали составной из двух частей (рис. 4). Основную часть изготавливали из легированной конструкционной стали 40Х с глухим цилиндрическим отверстием, донная

часть которого выполнялась конической с углом при вершине 120° . Рабочую часть выполняли из высоколегированных штамповых сталей (ДИ23 и 5ХНМ). Соединение частей 1, 2 заготовки осуществляли по переходной посадке на гидропрессе.

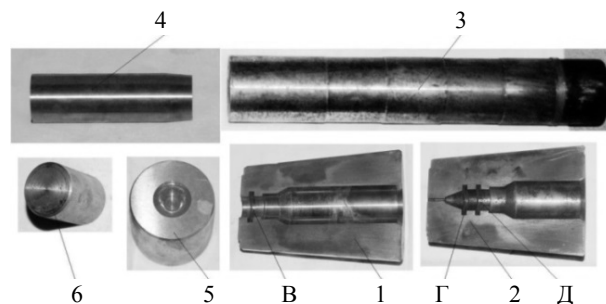


Рис. 3. Внешний вид экспериментальной оснастки для изготовления биметаллической детали пуансон: 1, 2 – формообразующая полуматрица с частичным и полным формообразованием детали в матрице соответственно; 3 – основной ударник; 4 – промежуточный боек; 5 – наковальня с рабочей полостью; 6 – биметаллическая заготовка

Fig. 3. External view of experimental tooling facilities for manufacturing of bimetallic punch item: 1, 2 – shape-forming semi-matrix with partial and complete item shape-formation in matrix; 3 – main striker; 4 – intermediate firing pin; 5 – anvil with working cavity; 6 – bimetallic billet

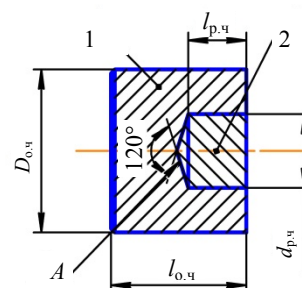


Рис. 4. Чертеж бесступенчатой составной заготовки для СГВ стержневых биметаллических деталей ШЮ: 1, 2 – материал основной (сталь 40Х) и рабочей (стали ДИ23, 5ХНМ) частей заготовки;

$D_{0.ч}, d_{р.ч}$ – диаметр основной и рабочей частей; $l_{0.ч}, l_{р.ч}$ – длина основной и рабочей частей заготовки

Fig. 4. Drawing of infinitely-variable composite billet for high-speed hot extrusion of rod bimetallic items for die tooling facilities: 1, 2 – material of main (Steel 40X) and working (Steel ДИ23, 5ХНМ) parts of billet; $D_{0.ч}, d_{р.ч}$ – diameter of main and working parts; $l_{0.ч}, l_{р.ч}$ – length of main and working parts of billet

Скоростное деформирование составных заготовок осуществляли с нагревом в камерной печи СНОЛ-2УМ. Для предотвращения окалинообразования образцы засыпали порошкооб-

разным древесным углем. В процессе нагрева температуру в рабочем пространстве печи контролировали с помощью платино-родиевой термопары ТПРТ 01.01-000-В3-Н-К799-4-320, соединенной с микропроцессорным измерителем-регулятором ТРМ-101. Время выдержки образцов в печи принималось из расчета полного прогрева по сечению и составляло 1 мин на 1 мм сечения заготовки [6].

Температурные интервалы горячей штамповки для выбранных сталей составляют: 40Х – 800–1250 °С; 5ХНМ – 750–1240 °С; 45ХЗВЗМФС (ДИ23) – 850–1160 °С. Учитывая такой разброс температур нагрева, деформацию составной заготовки осуществляли при температуре $T_0 = (1150 \pm 20)^\circ\text{C}$, при которой обеспечивается значительная термическая активация, способствующая в сочетании с движущимися дислокациями образованию прочного соединения разнородных материалов основной и рабочей частей заготовки [6–8].

Схема нагружения для выдавливания биметаллического пуансона приведена на рис. 5.

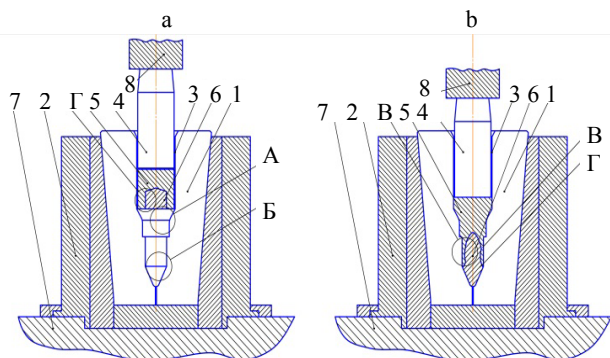


Рис. 5. Схема нагружения для выдавливания биметаллической стержневой детали: а – до нагружения; б – после нагружения

Fig. 5. Scheme of loading for extrusion of bimetallic core item: a – before loading; b – after loading

Разъемную коническую матрицу 1 помещали в обойму 2, которая крепилась на нижней плите 7 горизонтальной установки [9, 10]. При этом заготовка состояла из двух частей: основной 5 (сталь 40Х) и рабочей 6 (сталь ДИ23 или 5ХНМ). Заготовку помещали в разъемную матрицу 1 штампа для закрытого выдавливания, рабочая поверхность 3 которой имела шероховатость $Ra = 0,63\text{--}0,32$. Процесс скоростного выдавливания осуществлялся с коэффици-

ентами вытяжки: $\lambda_1 = 2,06$ – для участка А; $\lambda_2 = 3,2$ – для участка Б поковки.

Для деформации составной заготовки 3 мастер-пуансон 4 разгоняли основным бойком 8. В результате он получал запас энергии, обеспечивающий скоростную деформацию заготовки, которая сопровождалась совместным пластическим течением двух частей заготовок 5 и 6 в осевом направлении. Причем после ударного нагружения длина поверхности сопряжения заготовки двух совместно продеформированных частей В как минимум в два раза превышала исходную боковую длину Г сопряжения основной и рабочей частей заготовки (рис. 5а, б). Указанное удлинение (вытяжка) боковых поверхностей двух сопрягаемых разнородных нагретых металлов, протекающее в условиях всестороннего неравномерного сжатия и сопровождаемое синхронным формированием ювенильных сопрягаемых поверхностей, как раз и является основной причиной формирования сварного соединения этих материалов в осевом направлении [9, 10].

Фотографии биметаллических образцов, полученных скоростным горячим выдавливанием по данной схеме нагружения, показаны на рис. 6. При рассмотрении представленных шлифов, выполненных в продольной плоскости продеформированных образцов, хорошо видны четкие линии сварного соединения двух металлов, достигнутого за счет совместного скоростного осевого течения двух металлов в процессе их скоростного выдавливания.

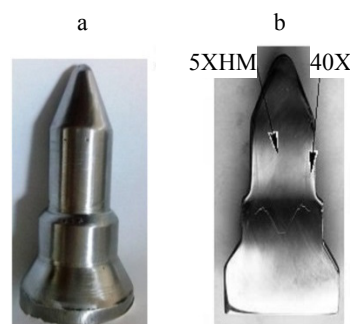


Рис. 6. Фото поковки биметаллического пуансона (а) и продольного шлифа (б): $v_0 = 70\text{--}80$ м/с; $M_n = 12,1$ кг; $T_0 = (1150 \pm 20)^\circ\text{C}$; композиция сталей 40Х + 5ХНМ, 40Х + ДИ23

Fig. 6. Photo of bimetallic punch forging (a) and longitudinal section (b): $v_0 = 70\text{--}80$ m/s; $M_n = 12.1$ kg; $T_0 = (1150 \pm 20)^\circ\text{C}$; composition of steels 40Х + 5ХНМ, 40Х + ДИ23

Микроструктуру в зоне шва исследовали на аттестованном сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения Mira (Tescan, Чехия) с микрорентгеноспектральным анализатором INCA Energy 350 (Oxford Instruments Analytical, Великобритания). Погрешность метода в данном случае составляла 3–5 относительных процентов.

Фотографии микроструктуры биметаллических образцов в зоне шва без микротрещин и расслоения приведены на рис. 7. Как видно из фотографий, качество полученного шва в центре и на краю образцов практически неизменно, что является доказательством сформированного хорошего физического контакта разнородных металлов по всей соединяемой площади.

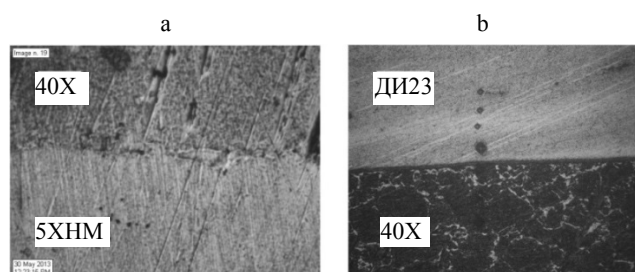


Рис. 7. Микроструктура биметаллических образцов, полученных СГВ, $\times 500$; $T_0 = (1150 \pm 20)^\circ\text{C}$;
а – в зоне шва 40X + 5XNM);
б – то же 40X + ДИ23

Fig. 7. Microstructure of bimetallic specimens obtained by high-speed hot extrusion, $\times 500$; $T_0 = (1150 \pm 20)^\circ\text{C}$;
а – in weld zone 40X + 5XNM);
б – ditto 40X + ДИ23

Микротвердость измеряли на приборе ПМТЗ с нагрузкой на индентор, равной 1 Н. Результаты измерения микротвердости в зоне соединения разнородных металлов приведены на рис. 8.

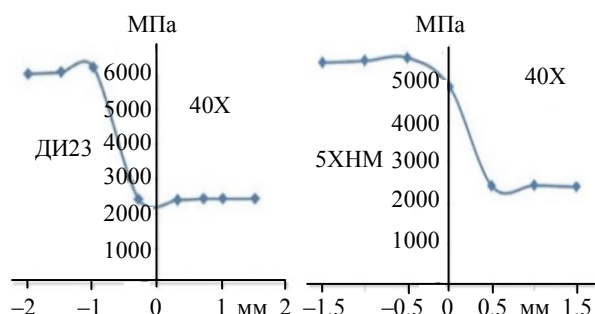


Рис. 8. Распределение микротвердости в зоне соединения композиций сталей 40X + ДИ23 и 40X + 5XNM

Fig. 8. Distribution of microhardness in the bond compositions of steels 40X + ДИ23 and 40X + 5XNM

Измерения микротвердости показали ее уменьшение при приближении к границе контакта как со стороны сталей 5XNM и ДИ23, так и стали 40X. Наличие более «мягкой», чем свариваемые материалы, зоны в окрестности контакта способствует снижению остаточных напряжений (вследствие их релаксации в этой зоне) и повышению прочности соединения.

ВЫВОДЫ

1. Разработаны экспериментальная оснастка и геометрия сопрягаемых частей составной заготовки. Отработана экспериментальная технология получения биметаллической стержневой детали штамповой оснастки типа «Пуансон».

2. Установлены параметры получения качественного сварного биметаллического соединения при деформировании со скоростью $v_0 = 70\text{--}80$ м/с и температуре составной заготовки $T_0 = (1150 \pm 20)^\circ\text{C}$. Соединение создается в осевом направлении при скоростном пластическом течении разнородных металлов (40X + ДИ23 и 40X + 5XNM) с вытяжкой $\lambda = 2,0\text{--}3,2$, приводящей к соответствующему удлинению начальной боковой поверхности сопрягаемых материалов в 2–3,2 раза. За счет такого удлинения формируются ювенильные боковые поверхности, на которых происходит схватывание (сварка) соединяемых разнородных материалов при их пластическом течении через коническую часть матрицы.

3. Исследованы микроструктуры полученных биметаллических образцов для композиций сталей 40X + ДИ23 и 40X + 5XNM. Качество полученного шва в центре и на краю образцов практически неизменно, отсутствуют микротрещины и расслоение, что является доказательством произошедшего физического контакта по всей соединяемой площади.

4. Установлены зависимости распределения микротвердости в направлении от плоскости контакта двух сталей в зоне соединения, характеризующие минимальным значением микротвердости на стыке полученного соединения. Наличие более пластичной области в плоскости контакта способствует снижению остаточных напряжений вследствие их релаксации в этой области и повышению прочности соединения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Качанов, И. В. Скоростное горячее выдавливание стержневых изделий / И. В. Качанов; под ред. Л. А. Исаевича. Минск: Технопринт, 2002. 327 с.
2. Здор, Г. Н. Технологии высокоскоростного деформирования материалов / Г. Н. Здор, Л. А. Исаевич, И. В. Качанов. Минск: БНТУ, 2010. 456 с.
3. Скоростное горячее выдавливание стержневых изделий с плакированием торцевой части / И. В. Качанов [и др.]. Минск: БНТУ, 2011. 198 с.
4. Голованенко, С. А. Производство биметаллов / С. А. Голованенко, Л. В. Меандров. М.: Металлургия, 1966. 153 с.
5. Исследование совмещенных процессов скоростного выдавливания с плакированием или деформационной сваркой при изготовлении стержневых и формообразующих деталей штамповой оснастки: отчет о научно-исследовательской работе, № ГР 20112407 / И. В. Качанов [и др.]. Минск: БНТУ, 2013. 274 с.
6. Шмыков, А. А. Справочник термиста / А. А. Шмыков. М.: Машгиз, 1956. 331 с.
7. Гельман, А. С. Основы сварки давлением / А. С. Гельман. М.: Машиностроение, 1970. 312 с.
8. Шоршоров, М. Х. Клинопрессовая сварка давлением разнородных металлов / М. Х. Шоршоров, В. А. Колесниченко, В. П. Алехин. М.: Металлургия, 1982. 112 с.
9. Способ штамповки деталей со стержнем: пат. 18113 Респ. Беларусь; МКИ В 21 J 5/00 / И. В. Качанов, Г. Н. Здор, Л. А. Исаевич, В. Н. Шарий, М. В. Кудин, В. В. Власов; опубл.: 30.04.2014.
10. Способ изготовления клапана двигателя внутреннего сгорания: пат. 16601 Респ. Беларусь; МКИ В 21 J 5/00 / И. В. Качанов, В. Н. Шарий, М. В. Кудин, Д. И. Буто, И. А. Ходос, В. В. Власов; опубл.: 30.12.2012.

Поступила 17.03.2015
Подписана в печать 28.05.2015
Опубликована онлайн 22.01.2016

REFERENCES

1. Kachanov I. V., Isaevich L. A. (2002) *High-Speed Hot Extrusion of Core Products*. Minsk, Tekhnoprint. 327 p. (in Russian).
2. Zdor G. N., Isaevich L. A., Kachanov I. V. (2010) *Technology of High-Speed Material Deformation*. Minsk: BNTU. 456 p. (in Russian).
3. Kachanov I. V., Zdor G. N., Isaevich L. A., Shary V. N. (2011) *High-Speed Hot Extrusion of Core Products with Butt end Cladding*. Minsk: BNTU 198 p. (in Russian).
4. Golovanenko S. A., Meandrov L. V. (1966) *Production of Biomaterials*. Moscow, Metallurgiya. 153 p. (in Russian).
5. Kachanov I. V., Zdor G. N., Isaevich L. A., Shary V. N., Kudin M. V., Mikhnovets M. M., Lenkevich S. A., Vlasov V. V., Rubchenia A. A., Belkevich N. A., Filipchik A. V., Shleg A. A. (2013) *Investigation on Combined Processes of High-Speed Extrusion and Cladding or Deformation Welding While Manufacturing Core and Shaping Parts for Die Tooling*. Report on R&D Activity, No GP 20112407. Minsk: BNTU. 274 p. (in Russian, Unpublished).
6. Shmykov A. A. (1956) *Handbook of Heat-Treatment Operator*. Moscow, Mashgiz. 331 p. (in Russian).
7. Gelman A. S. (1970) *Fundamentals of Pressure Welding*. Moscow, Mashinostroenie. 312 p. (in Russian).
8. Shorshorov M. Kh., Kolesnichenko V. A., Alekhin V. P. (1982) *Wedge Pressure Welding of Dissimilar Metals*. Moscow, Metallurgiya. 112 p. (in Russian).
9. Kachanov I. V., Zdor G. N., Isaevich L. A., Shary V. N., Kudin M. V., Vlasov V. V. (2014) *Method for Stamping of Items with Core*. Patent Republic of Belarus No 18113 (in Russian).
10. Kachanov I. V., Shary V. N., Kudin M. V., Buto D. I., Khodos I. A., Vlasov V. V. (2012) *Method for Manufacturing Valve of Internal Combustion Engine*. Patent Republic of Belarus No 16601 (in Russian).

Received: 17.03.2015
Accepted: 28.05.2015
Published online: 22.01.2016

УДК 621.81.004.67 (075)

Выбор способа восстановления деталей

Докт. техн. наук, проф. В. П. Иванов¹⁾¹⁾Полоцкий государственный университет (Новополоцк, Республика Беларусь)© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Даны определения процесса и способа восстановления деталей с анализом известных методов их выбора. Определены геометрические параметры и эксплуатационные свойства, которые должны быть обеспечены при восстановлении деталей. Усовершенствован выбор способа восстановления детали, позволяющий синтезировать оптимальный процесс этого восстановления по критерию расхода производственных ресурсов с учетом ограничений по качеству, производительности и безопасности. Обоснованы мероприятия, удовлетворяющие установленным ограничениям. Указана направленность технических решений, обеспечивающих полное использование остаточной долговечности деталей ремонтного фонда за счет применения без пропусков всех ремонтных размеров заготовок с уточнением их значений, равномерного снятия припуска при обработке заготовок резанием при оптимальном базировании, использования процессов нанесения покрытий только в технически обоснованных случаях, применения правки с термическим фиксированием ее результатов или всесторонним сжатием деформируемых элементов. Предложено ограничить число капитальных ремонтов агрегатов вместе с восстановлением базовых и основных деталей двумя ремонтами за весь их срок службы. Число наплавов шеек валов необходимо ограничить одной наплавкой в течение жизненного цикла детали с целью сохранения их длины в установленных пределах. Рекомендовано расширение области применения объемного пластического деформирования материала в виде термопластической раздачи или обжатия ремонтных заготовок класса «тела вращения с отверстиями», обеспечивающего припуск на обработку наружных и внутренних поверхностей под номинальные размеры без нанесения покрытий. Установлена структура материала покрытия с мелкодисперсными включениями карбидов или нитридов металлов и преимущественной ориентацией структурных составляющих перпендикулярно восстанавливаемой поверхности под влиянием отвода теплоты, которая в результате поверхностного пластического деформирования ориентирует оси волокон тангенциально в направлении относительного скольжения. Это препятствует росту усталостных радиально ориентированных трещин.

Ключевые слова: деталь, восстановление, остаточная долговечность, оптимизация, параметры, ограничения

Для цитирования: Иванов, В. П. Выбор способа восстановления деталей / В. П. Иванов // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 1. С. 9–17

Selection of Method for Restoration of Parts

V. P. Ivanov¹⁾¹⁾Polotsk State University (Novopolotsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper contains definitions for a process and a methodology for restoration of parts on the basis of the analysis of the known methods and their selection. Geometric parameters and operational properties that should be provided for restoration of parts have been determined in the paper. A process for selection of the required method for restoration parts has been improved and it makes it possible to synthesize an optimal process of the restoration according to a criterion of industrial resource consumption with due account of quality, productivity and security limits. A justification on measures that meet the required limits has been presented in the paper. The paper shows a direction of technical solutions that ensure complete use of residual life of repair fund parts. These solutions can be achieved through close application of all repair sizes of work-pieces with revision of their values, uniform removal of the allowance while cutting the work-pieces at optimum locating, application of coating processes only in technically justified cases, application of straightening with thermal fixing of its results or all-around compression of deformable elements. The paper proposes to limit a number of overhauls for the units together with

Адрес для переписки

Иванов Владимир Петрович
Полоцкий государственный университет
ул. Блохина, 29,
211440, г. Новополоцк, Витебская обл., Республика Беларусь
Тел.: +375 214 53-10-47
ivprem@tyt.by

Address for correspondence

Ivanov Vladimir P.
Polotsk State University
29 Blohina str.,
211440, Novopoltsk, Vitebsk Province, Republic of Belarus
Tel.: +375 214 53-10-47
ivprem@tyt.by

restoration of basic and fundamental parts by two repairs for the whole period of their lifetime. Number of shaft journal building-up should be limited by one building-up operation throughout the whole life cycle of the part with the purpose to preserve its length within the prescribed limits. It has been recommended to expand an application area of volumetric plastic deformation of material in the form of thermoplastic distribution or reduction of repair work-pieces representing class of rotation bodies with holes that ensures an allowance to machine external and internal surfaces for nominal dimensions without coating. A structure of the coating material with fine inclusions of carbides or nitrides of metals and preferred orientation of structural components perpendicular to the restored surface under the influence of heat removal has been established in the paper. Due to surface plastic deformation the structure orientates fiber axis tangentially in the direction of relative sliding that inhibits growth of fatigue radially oriented cracks.

Keywords: part, restoration, residual life, optimization, parameters, limits

For citation: Ivanov V. P. (2016) Selection of Method for Restoration of Parts. *Science & Technique*. 15 (1), 9–17 (in Russian)

Введение

Восстановление деталей – технологический процесс возвращения им материала вместо изношенного и (или) доведения до нормативных значений изменившихся геометрических параметров и эксплуатационных свойств. К геометрическим параметрам детали относят взаимное расположение, форму, размеры и шероховатость рабочих поверхностей, а к основным эксплуатационным свойствам – износостойкость трущихся поверхностей, усталостную прочность и жесткость детали, ее массу и распределение массы относительно осей вращения и инерции.

Восстановление деталей позволяет использовать их материал, форму и остаточную долговечность, что сокращает потребление запасных частей, живого труда, энергии и материалов, а также способствует сохранению окружающей среды (масса отходов при восстановлении деталей в 20 раз меньше, чем при их изготовлении [1]). Восстановление деталей – основа ремонта машин.

Задача выбора способа восстановления детали впервые была поставлена и решена в завершеном виде В. А. Шадричевым [2, 3], а впоследствии многократно изменялась и решалась другими авторами. Известны три основных метода выбора процесса восстановления детали, отличающихся техническими и экономическими критериями. Первый основан на расчете стоимости восстановления детали C_B и сопоставлении ее с ценой новой детали Π_H

$$C_B \leq \Pi_H.$$

По второму методу сравнивают между собой комплексные величины в виде отношений

стоимости и цены к ресурсу деталей – новой и восстановленной

$$\frac{C_B i_B}{I_B} \leq \frac{\Pi_H i_H}{I_H}, \quad (1)$$

где i_B, i_H – скорость изнашивания восстановленной и новой деталей, мм/ч; I_B, I_H – предельный износ восстановленной и новой деталей, мм.

Третий метод учитывает стоимость и долговечность новой и восстановленной деталей

$$C_B \leq k_d \Pi_H, \quad (2)$$

где k_d – коэффициент долговечности восстановленной детали по отношению к долговечности новой детали.

Критерии (1) и (2), по сути, одинаковы. Недостатки первого метода состоят в отсутствии учета технического состояния и послеремонтной наработки восстановленной детали. Второй и третий методы допускают в производство способы, которые при малой стоимости восстановления формируют и малую долговечность детали по сравнению с нормативной наработкой агрегата.

Критерии оценки процесса восстановления деталей имеют большое значение для ремонтной практики, поэтому непрерывно уточнялись. Например, А. Н. Батищев [4] ввел комбинированный критерий Φ_{ki} , отражающий энергоемкость, трудоемкость, приведенные затраты и долговечность детали:

$$\Phi_{ki} = \frac{K_{1i} K_{2i} K_{3i}}{k_{di}} \rightarrow \min,$$

где i – индекс, обозначающий номер способа восстановления детали; K_{1i}, K_{2i} – коэффициент энергоемкости и трудоемкости технологического процесса восстановления детали i -м спо-

собою; $K_{3i} = Z_{vi}/C_n$ – коэффициент экономичности; Z_{vi} – затраты на восстановление детали; k_{di} – коэффициент долговечности.

Способ восстановления деталей, выбранный на основе априорного ранжирования мнений экспертов [5], субъективен. Все рассмотренные методы оценивают полученные результаты, но ни один из них не формирует сам процесс восстановления детали, что обязывает вернуться к проблеме и искать ее новое решение.

Цель исследований – разработка метода оптимизационного синтеза технологического процесса восстановления детали.

Содержание способа восстановления детали

Деталь ремонтируемого агрегата во время своего превращения в исправную деталь последовательно пребывает в состояниях: детали ремонтного фонда, исходной и ремонтной заготовок и восстановленной детали. Такое превращение связано с изменением количества, состава и структуры материала поверхностных слоев, его свойств и геометрических параметров поверхностей.

Исходная заготовка – очищенная деталь ремонтного фонда с устранимыми повреждениями, а ремонтная заготовка – восстанавливаемая деталь с припусками на обработку резанием. Исходная заготовка в общем случае превращается в ремонтную заготовку путем создания припусков на восстанавливаемых поверхностях, а ремонтная заготовка в восстановленную деталь – в результате механической (резанием и давлением) и термической обработки. Восстанавливаемая деталь приобретает совокупность необходимых параметров и свойств в результате выполнения технологического процесса. Множество технологических операций на пути превращения исходной заготовки в деталь образуют способ восстановления детали.

Ограничения процесса и их обеспечение

Ограничения – показатели, значения которых должны быть обеспечены неукоснительно. К ним относят конструкторские параметры деталей, их эксплуатационные свойства, производительность процесса, безопасность труда и требования охраны окружающей среды.

Составляющие технических решений (в виде обоснования используемых материалов, технологических операций, оборудования, приспособлений и инструментов) должны быть пропущены сквозь «сито ограничений», т. е. выделены для целей синтеза только те из них, которые обеспечивают эти ограничения. В процесс включают операции, обеспечивающие установленные требования к геометрическим параметрам изделий и свойствам их материала, а виды и количество применяемого оборудования – заданную производительность процесса. Геометрические параметры деталей обеспечиваются применением технологического оборудования необходимой точности, содержанием его в исправном состоянии, отнесением долей припуска к отдельным частям обработки резанием и базированием заготовок.

При черновой обработке резанием снимают основную часть операционного припуска. В первой части этой обработки обеспечивают нужное взаимное расположение поверхностей детали, а во второй – форму ее геометрических элементов. Параметры расположения обеспечивают ориентированием заготовки относительно движения подачи, при этом добиваются вначале точности углового расположения поверхностей, а затем точности расстояний. Это объясняется тем, что точность относительного поворота поверхностей обеспечивают методами, практически исключая возможность последующей коррекции, а точность расстояний – методами, позволяющими уменьшение отклонений. Взаимное расположение поверхностей заготовки может быть восстановлено и пластическим деформированием ее материала путем правки. Форму геометрических элементов обеспечивают ориентированием заготовки относительно направления главного движения, прямолинейностью направляющих станка и их параллельностью относительно оси вращения шпинделя, жесткостью станка и его техническим состоянием.

В результате чистовой обработки резанием достигают заданной точности размеров и шероховатости поверхностей, близкой к нормативной. Чистовая обработка резанием шеек валов в большинстве случаев абразивная, а для отверстий – тонкое растачивание и хонингование. На отделочных операциях (полирование,

суперфиниширование, хонингование) снимают разупрочненный слой в результате предыдущей обработки резанием и обеспечивают требуемую шероховатость поверхностей. Структурно-химические характеристики (химический и фазовый составы, дислокационная структура) и отсутствие усталостных трещин на поверхностях деталей определяют работоспособность материала трущихся поверхностей, работающих в условиях знакопеременных нагрузок.

Все указанные параметры не должны уступать характеристикам новых деталей, изготовленных машиностроительными заводами; они отвечают за износостойкость, усталостную прочность и жесткость элементов деталей и обеспечивают нормативную долговечность последних. Нормативной износостойкостью обладают детали, материал трущихся поверхностей которых удовлетворяет следующим требованиям. Во-первых, его структура состоит из частиц твердой фазы, удерживаемых в прочной матрице (правило Шарпи). Наиболее часто роль упрочняющей фазы играют высокотвердые химические соединения (карбиды, бориды, нитриды, оксиды и интерметаллиды), а матричной фазы – твердые растворы в металлах. Требуемый состав и структура материала восстановительных покрытий, работающих в различных условиях в составе разных деталей, определены ранее [6]. Во-вторых, обеспечен положительный градиент механических свойств материала по глубине его поверхностного слоя

$$\frac{d\tau}{dz} > 0,$$

где τ – разрушающее напряжение сдвига, Па; z – значение координаты, направленной в глубину материала перпендикулярно поверхности трения, м.

Последнее свойство обеспечивают насыщением поверхностного слоя материала вакансиями (теория Берналла) более 10 % от максимального количества с созданием его сверхпластичной наноструктуры, адсорбционным введением ПАВ, образованием мицелл и их переносом в зону трения (эффекты Ребиндера и Дерягина) или наличием в зоне трения слоистых материалов (графита, сульфидов, серпентинитов и др.) со слабыми молекулярными свя-

зями между слоями. Усталостную прочность элементов деталей обеспечивают уменьшением влияния концентраторов напряжений, торможением дислокаций, их равномерным распределением в объеме материала и созданием на их пути барьеров. Жесткость упругих деталей (пружин, рессор и торсионов), определяемую модулем упругости участвующего в работе материала, обеспечивают обработкой давлением или термомеханической обработкой.

Химический и фазовый составы материала поверхностных слоев восстанавливаемых поверхностей и его дислокационную структуру необходимо выборочно контролировать на образцах-свидетелях в лабораторных условиях. Массу поступательно движущихся деталей доводят до нормативных значений срезанием лишнего металла в определенных местах, а вращающиеся детали уравнивают балансировкой.

Станки выбирают в зависимости от вида и шероховатости обрабатываемых поверхностей, размеров вращающихся заготовок (диаметра и длины), размеров неподвижных заготовок, устанавливаемых на столе станка, (или размеров приспособлений с заготовками), точности и производительности обработки. Допуск линейного размера обработанного элемента заготовки согласуют с ценой деления лимба станка или точностью позиционирования системой ЧПУ. Разряд последней значащей цифры допуска на размер должен быть не меньше цены деления лимба.

Необходимое число единиц оборудования n_o на операциях, связанных с ручным или машинно-ручным трудом (разборочный, сборочный, паяльный и др.), назначают по трудоемкости выполняемых работ

$$n_o = \frac{T_{г.о.тр}}{\Phi_{д.о} \eta_{и.в}},$$

где $T_{г.о.тр}$ – годовая трудоемкость работ, выполняемая на оборудовании данного вида, чел.-ч/год; $\Phi_{д.о}$ – действительный годовой фонд времени оборудования, ч/год; $\eta_{и.в}$ – коэффициент использования оборудования во времени.

По станкоемкости работ определяют необходимое количество оборудования с машинны-

ми способами обработки (например, металло-режущих станков). В этом случае годовой объем работ выражают в станко-часах. Небольшие партии обрабатываемых заготовок обуславливают частые переналадки оборудования, поэтому учитывают затраты времени и на наладочные работы:

$$n_o = \frac{T_{г.о.ст} + T_{г.о.п}}{\Phi_{д.о} \eta_{и.в}},$$

где $T_{г.о.ст}$ – годовая станкоемкость работ, выполняемая на оборудовании данного вида, станко-ч; $T_{г.о.п}$ – годовой объем переналадок оборудования, ч.

Безопасность труда и охрана окружающей среды являются важными ограничениями при организации технологического процесса. Требования к ним изложены в соответствующих нормативных документах. Однако при выборе способа восстановления детали учитывают затраты, связанные с созданием и использованием соответствующих процессов и средств.

Параметр оптимизации – показатель, определяющий эффективность производства. Таким показателем служит расход производственных ресурсов, значение которого стремятся минимизировать.

Производственные ресурсы (в экономике оборотные средства) – материалы, полуфабрикаты, запасные части, энергоносители и рабочее время исполнителей, необходимые для текущего обеспечения производства. Производственные ресурсы ПР включают материальную, энергетическую и трудовую составляющие

$$ПР = \sum_{i=1}^{i=k} [M_i + O_i + БТ_i + ЗЧ_i + Э_i + P_i + A_i + (1 + O_{с.с} + O_{ф.з} + O_{о.с})ЗП_i] \rightarrow \min,$$

где i – индекс, обозначающий принадлежность величины к данной операции, $i = 1, \dots, k$; M_i – затраты на материалы, руб.; O_i – стоимость переработки вредных отходов, руб.; $БТ_i$ – затраты, связанные с обеспечением безопасного труда, руб.; $ЗЧ_i$ – стоимость запасных частей, руб.; $Э_i$ – затраты на энергию, руб.; P_i – затраты на содержание в исправном состоянии и восстановление ресурса средств ремонта, руб.; A_i – амортизационные отчисления, руб.; $O_{с.с}$ – нор-

матив отчислений на социальное страхование (0,35); $O_{ф.з}$ – норматив отчислений в чрезвычайный налог и фонд занятости населения (0,04); $O_{о.с}$ – норматив отчислений по обязательному страхованию работников от несчастных случаев (0,003); $ЗП_i$ – основная и дополнительная заработная плата рабочего, руб.

На запасные части приходится 40–50 % себестоимости ремонта агрегатов, на полуфабрикаты и материалы – 10–16 %, а на тепловую и электрическую энергию – 11–14 %. Максимальное использование остаточной долговечности ремонтного фонда деталей позволяет в наименьшем количестве применять дорогие запасные части.

Постановка задачи выбора способа восстановления детали следующая: из числа возможных типов и видов технологических операций, образующих процесс, найти такую их последовательность, которая обеспечивает установленные ограничения с наименьшим расходом производственных ресурсов.

Выбор варианта технологического процесса предполагает поиск как новых, так и оптимальных технических решений. Связное множество операций процесса восстановления детали выбирают из графа (рис. 1), составленного из вершин и дуг.

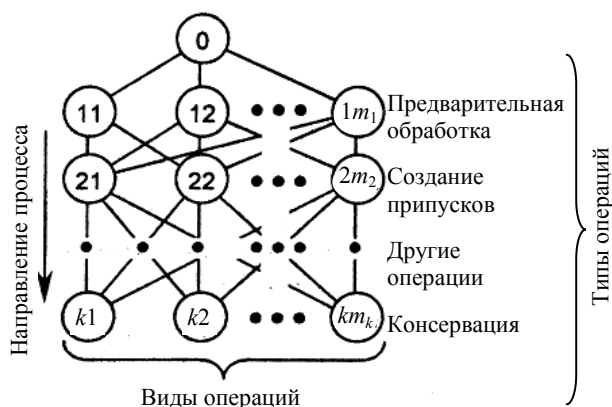


Рис. 1. Граф вариантов технологического процесса восстановления детали: 1, 2, ..., k – типы операций; $m_1, m_2, \dots, m_k$ – количество видов операций данного типа

Fig. 1. Graph of variants for technological process of part restoration: 1, 2, ..., k – operation types; $m_1, m_2, \dots, m_k$ – number of operations of the given type

Горизонтальные ряды вершин графа – это i -е подмножества однотипных технологических операций. Каждый тип операций включает m их видов ($m = m_1, m_2, \dots, m_k$). Например, операция типа «нанесение покрытия» может быть

представлена такими ее видами, как наплавка, напыление, химическое или электрохимическое нанесение и др. Виды технологических операций находят из логических и эвристических представлений о различных способах преобразования энергии и материи, использования новых материалов и различных физических эффектов и их всевозможных сочетаний. Длину каждой дуги графа определяют как расход ресурсов в стоимостном выражении на подготовку и выполнение последующей операции, отнесенный к одной детали.

Связное подмножество вершин, взятых по одной из каждого ряда графа, определяет один вариант технологического процесса. Число таких вариантов достигает произведения $m_1 \cdot m_2 \cdot \dots \cdot m_k$. Несовместимость некоторых смежных операций друг с другом сокращает количество вариантов процесса.

Оптимизация задачи выражается в поиске кратчайшего пути из вершины O в одну из вершин нижнего яруса графа, а подмножество вершин на этом пути определяет оптимальный способ восстановления детали. Оптимизация технического решения на графе на основе динамического программирования [7] заключалась в следующем: в каком бы состоянии ни находилась производственная система в результате определенного числа шагов, последующее управление на ближайшем шаге выбирают таким образом, чтобы оно в совокупности с оптимальным управлением на всех последующих шагах приводило к минимальному расходу ресурсов (в стоимостном выражении) на оставшихся шагах, включая данный:

$$\begin{aligned} & \text{ПР}_{i+1} = \\ & = \min (\text{по всем вершинам графа}) [\text{ПР}_i + \text{ПР}_{(i+1)-1}], \end{aligned}$$

где i – операции процесса; ПР_{i+1} – расход производственных ресурсов при выполнении $i + 1$ операций; ПР_i – то же ресурсов при выполнении i операций при условии, что соответствующая часть процесса выбрана оптимальным образом; $\text{ПР}_{(i+1)-1}$ – то же при выполнении $(i+1)$ -й операции процесса.

Выбранные на графе направления движения из его вершин обозначают стрелками. Эти связи обуславливают оптимальные сочетания операций на предыдущих шагах с операцией на последующем шаге. Расчеты при этом ведутся от вершин нижнего их ряда к вершине O , по-

скольку затраты на графе под нижним рядом вершин формально равны нулю. В вершины графа вписывают значения ПР_{i+1} . Двигаясь в найденных направлениях из вершины O графа через одну из вершин каждого яруса графа, находят сочетание операций, которое при прочих равных условиях обеспечивает наименьший расход производственных ресурсов на восстановление детали. Соответствующее значение целевой функции читают в верхней вершине графа. Пример численного решения задачи приведен в [6].

Таким образом, предлагаемый метод выбора технологического процесса восстановления детали основан на учете многообразия освоенных и гипотетически возможных операций процесса (создания ремонтных заготовок, обработки и упрочнения), удовлетворяет установленным ограничениям и обеспечивает наименьший расход производственных ресурсов на свою реализацию. Если производственные возможности предприятия не позволяют внедрить предложенный процесс, то путем исключения его неосуществимых признаков можно найти другой процесс, наиболее близкий к оптимальному решению. Изменяющееся соотношение затрат на материалы, энергию и заработную плату и появление новых технических решений требует периодического пересмотра результатов оптимизации.

Мероприятия по полному использованию остаточной долговечности деталей

Моделирование процессов восстановления деталей и их оптимизация позволили впервые рассмотреть все следующие друг за другом в течение всего жизненного цикла одноименных деталей отдельные процессы их восстановления при использовании в одном агрегате (необезличенный метод) или в разных агрегатах (обезличенный метод). Это обеспечило более полное использование остаточной долговечности деталей. Моделирование послужило обоснованием следующих направлений технических решений.

Ряд деталей (валы, гильзы, поршни и др.), входящих в трущиеся соединения, имеют на момент восстановления небольшие износы (несколько сотых миллиметра). На их шейки, отверстия и плоскостные элементы предусмотрены ремонтные размеры, которые достигают только обработкой резанием. В этом случае ре-

монтажные заготовки получают из исходных заготовок без нанесения покрытий или силового перемещения материала между элементами заготовки. С точки зрения экономичности процесса восстановления, должны быть использованы все предусмотренные ремонтные размеры заготовок обеспечением производства сопрягаемыми деталями всех ремонтных размеров (например, вкладышами коленчатого вала, поршнями и др.), правкой длинных деталей типа валов перед обработкой, равномерным снятием припуска при обработке резанием за счет оптимального базирования, исключением субъективного фактора.

В ряде публикаций высказывалось мнение о нецелесообразности и даже вреде правки деталей типа вал. Каково бы ни было отношение к ней (в том числе и негативное), правка применялась и применяется как в ремонтном производстве, так и на машиностроительных предприятиях с использованием, в том числе, импортного оборудования. Одной лишь обработкой резанием не удастся достичь нормативного расположения поверхностей по причине наличия внутренних остаточных напряжений в материале детали и неуправляемого их перераспределения после снятия слоев материала на операциях обработки резанием. Требуется дополнять операцию правки «щадящими» мероприятиями, например термическим фиксированием ее результатов или всесторонним сжатием деформируемых элементов.

Число капитальных ремонтов агрегатов вместе с восстановлением базовых и основных деталей необходимо ограничить двумя за весь их срок службы. Вероятность обработки коренных шеек коленчатого вала под очередной ремонтный размер (без пропуска ремонтного размера) близка к единице. Значение одноименного показателя при обработке шатунных шеек составляет $\approx 0,20$ мм [8–10]. Если увеличить ремонтный интервал шеек с 0,25 до 0,50 мм, то это позволит уверенно вести обработку шеек под очередной ремонтный размер. Количество ремонтных размеров шеек валов избыточно, их максимальное число вполне можно ограничить двумя, что снизит нагрузку на моторные заводы в части изготовления вкладышей коленчатых валов большой номенклатуры.

Уменьшение длины вала при каждой наплавке (рис. 2) с сопутствующим уменьшением

предела его выносливости обуславливает ограничение числа наплавов до одной в течение жизненного цикла детали. Целесообразность мероприятия коррелируется с требованием использования всех предусмотренных ремонтных размеров.

Нанесение покрытий при восстановлении трущихся поверхностей деталей связано с образованием на этих поверхностях материала нового химического, структурного и фазового составов, отличного от материала основы. Это открывает перспективы существенного повышения износостойкости восстановленных поверхностей различных деталей за счет насыщения материала покрытия легирующими элементами (углеродом, азотом, бором или их сочетанием), образования упрочняющей фазы с последующими закалкой и отпуском. При этом состав исходного материала покрытия согласуют с составом упрочняющей фазы, которая образуется позже. Физико-техническая обработка в виде лазерной и электронно-лучевой обработки способствует формированию такой фазы.

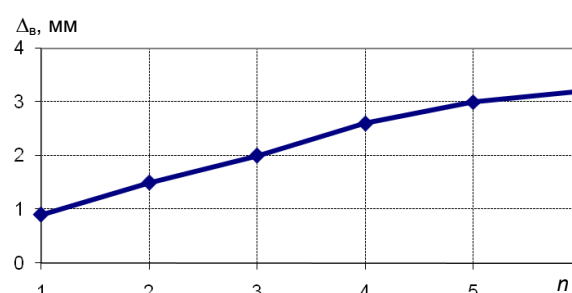


Рис. 2. Среднее уменьшение длины коленчатых валов Δ_b от числа наплавов n

Fig. 2. Average decrease of crankshaft length Δ_b due to building-up number n

Большой экономической эффективностью обладает объемное пластическое деформирование материала в виде термопластической раздачи или обжатия ремонтных заготовок класса «тела вращения с отверстиями» (рис. 3). Припуск на обработку наружных и внутренних поверхностей под номинальные размеры образуется без нанесения покрытий. Широкое применение способа в производстве требует исследований стабильности восстанавливаемых размеров при эксплуатации детали и влияния режимов процесса на строение поверхностного слоя и его износостойкость.

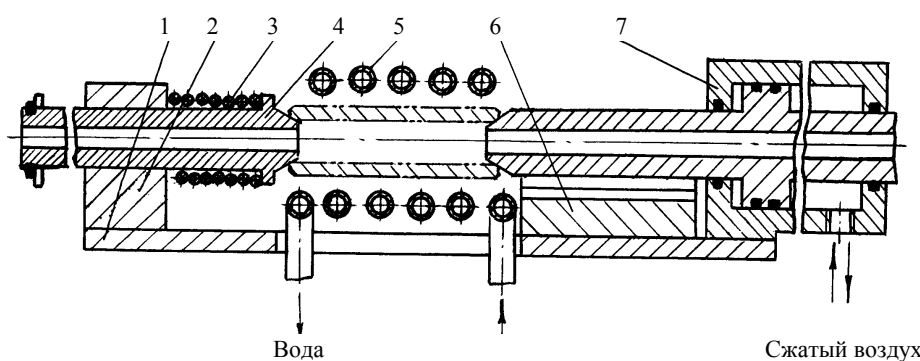


Рис. 3. Схема станда для термопластической раздачи поршневых пальцев: 1 – плита; 2 – кронштейн; 3 – пружина; 4 – полый шток; 5 – индуктор; 6 – направляющая призма; 7 – пневмоцилиндр

Fig. 3. Scheme of stand for thermoplastic distribution of piston pins: 1 – plate; 2 – bracket; 3 – spring; 4 – hollow rod; 5 – inductor; 6 – guiding prism; 7 – pneumatic cylinder

Поверхностное пластическое деформирование (ППД) упрочняет материал наплавленных покрытий, поэтому не следует стремиться к высокой исходной поверхностной твердости их материала. Нормативные значения износостойкости и усталостной прочности восстановленных шеек валов обеспечивает ферритно-мартенситная структура материала покрытия с мелкодисперсными включениями карбидов или нитридов металлов и преимущественной ориентацией структурных составляющих перпендикулярно восстанавливаемой поверхности (рис. 4) под влиянием отвода теплоты.

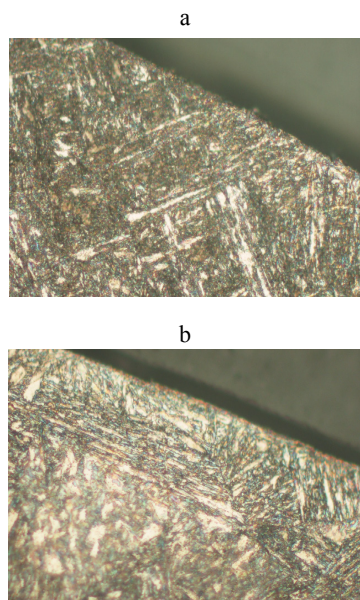


Рис. 4. Поверхностные слои наплавленных образцов $\times 500$: а – без ППД; б – с последующим ППД

Fig. 4. Surface layers of build-up specimen $\times 500$: а – without surface plastic deformation; б – with subsequent surface plastic deformation

В последующем деформирующее усилие ориентирует оси волокон тангенциально в направлении относительного скольжения, что препятствует росту усталостных радиально ориентированных трещин и обеспечивает интенсивность изнашивания на 10–15 % меньше по сравнению с параметром новых валов. Усталостные трещины зарождаются в переходной зоне между покрытием и деталью, а уменьшение этой зоны с 65–70 до 10–15 мкм увеличивает предел выносливости шеек в 1,4–1,5 раза [11, 12].

ВЫВОД

Восстановление деталей как основной источник эффективности ремонта машин должно обеспечить достижение нормативной послеремонтной наработки при минимальном расходе производственных ресурсов на свою организацию. Усовершенствован выбор способа восстановления детали, позволяющий синтезировать оптимальный процесс этого восстановления по критерию расхода производственных ресурсов с учетом ограничений по качеству, производительности и безопасности. Впервые рассмотрены следующие друг за другом в течение всего жизненного цикла детали отдельные процессы ее восстановления и обоснована направленность технических решений, обеспечивающих полное использование остаточной долговечности деталей ремонтного фонда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лялякин, В. П. Восстановление и упрочнение деталей машин в агропромышленном комплексе России и Бе-

- ларуси / В. П. Лялякин, В. П. Иванов // Ремонт, восстановление, модернизация. 2004. № 2. С. 2–7.
2. Шадричев, В. А. Основы выбора рационального способа восстановления автомобильных деталей металлопокрытиями / В. А. Шадричев. М.; Л.: Машгиз, 1962. 296 с.
 3. Шадричев, В. А. Основы технологии автостроения и ремонт автомобилей / В. А. Шадричев. Л.: Машиностроение, Ленинград. отд-ние, 1976. 560 с.
 4. Батищев, А. Н. Методика обоснования рационального способа восстановления изношенных деталей / А. Н. Батищев // Современное оборудование и технологические процессы для восстановления и упрочнения деталей машин: тез. докл. науч.-техн. конф. стран – членов СЭВ «Ремдеталь-88», 17–21 октября 1988 г., г. Пятигорск. М., 1988. Ч. 1. С. 23–24.
 5. Васильев, Н. Г. Выбор способа восстановления изношенных деталей / Н. Г. Васильев, И. И. Галиев, Т. Н. Васильева // Сварочное производство. 1996. № 7. С. 13–15.
 6. Восстановление деталей машин / Ф. И. Пантелеенко [и др.]; под ред. В. П. Иванова. М.: Машиностроение, 2003. 672 с.
 7. Беллман, Р. Динамическое программирование / Р. Беллман; пер. с англ. М.: Иностранная лит., 1960. 400 с.
 8. Иванов, В. П. Обоснование доли годных деталей ремонтного фонда, годных для дальнейшего применения без ремонтных воздействий / В. П. Иванов, А. П. Кастрюк // Агропанорама. 2013. № 5. С. 38–44.
 9. Кастрюк, А. П. Исследование возможности обработки шеек коленчатых валов под очередные ремонтные размеры / А. П. Кастрюк // Агропанорама. 2012. № 1. С. 38–41.
 10. Кастрюк, А. П. Ресурсосберегающие процессы восстановления валов / А. П. Кастрюк, Т. В. Вигерина // Вестник белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2011. № 2. С. 118–122.
 11. Кастрюк, А. П. Ресурсосбережение и качество ремонта агрегатов машин с восстановлением их деталей / А. П. Кастрюк, Т. В. Вигерина. Новополоцк: ПГУ, 2012. 200 с.
 12. Вигерина, Т. В. Технология восстановления коленчатых валов двигателей из высокопрочного чугуна и конструкционной стали напылением, наплавкой и поверхностным пластическим деформированием / Т. В. Вигерина. Минск: БНТУ, 2013. 23 с.
 - Modernizatsia [Repair, Restoration, Modernization], (2), 2–7 (in Russian).
 2. Shadrichev V. A. (1962) *Fundamentals on Selection of Rational Method for Restoration of Automobile Parts While Using Metallic Coatings*. Moscow, Leningrad, Mashgiz. 296 p. (in Russian).
 3. Shadrichev V. A. (1976) *Fundamentals of Technology for Automotive Engineering and Automobile Repair: Textbook for Higher Education Institutions*. Leningrad, Mashinostroenie, Leningrad Branch. 560 p. (in Russian).
 4. Batishchev A. N. (1988) *Methodology for Substantiation of Rational Method for Restoration of Worn-Out Parts. Modern Equipment and Technological Processes for Restoration and Strengthening of Machinery Parts. Abstracts of Reports at Scientific and Technical Conference of Comecon Countries "Remdetal-88" (October 17–21, 1988, Piatigorsk). Part. 1*. Moscow, 23–24 (in Russian).
 5. Vasiliev N. G., Galiev I. I., Vasilieva T. N. (1996) *Selection of Method for Restoration of Worn-Out Parts. Svarochnoe Proizvodstvo [Welding Production]*, (7), 13–15 (in Russian).
 6. Panteleenko F. I., Lyalyakin V. P., Ivanov V. P., Konstantinov V. M. (2003) *Restoration of Machinery Parts. Reference Book*. Moscow, Mashinostroenie. 672 p. (in Russian).
 7. Bellman R. (1957) *Dynamic Programming*. Princeton U.P. 365 p. (Russ. ed.: Bellman R. (1960) *Dinamicheskoe Programirovanie*. Moscow, Inostrannaya Literature. 400 p.).
 8. Ivanov V. P., Kastriouk A. P. (2013) *Substantiation of Portion of Accepted Parts for Repair Fund and Further Application without Repair Operations. Agropanorama*, (5), 38–44 (in Russian).
 9. Kastriouk A. P. (2012) *Investigations on Possibility to Machine a Crankshaft Neck for Regular Repair Size. Agropanorama*, (1), 38–41 (in Russian).
 10. Kastriouk A. P., Vigerina T. V. (2011) *Resource-Saving Processes for Shaft Restoration. Vestnik Belorusskoi Gosudarstvennoi Selskokhoziaistvennoi Akademii [Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy]*, (2), 118–122 (in Russian).
 11. Kastriouk A. P., Vigerina T. V. (2012) *Resource-Saving and Quality of Machinery Component Repair with Restoration of their Parts*. Novopolotsk: Polotsk State University. 200 p. (in Russian).
 12. Vigerina T. V. (2013) *Tekhnologiia Vosstanovleniia Kolenchatykh Valov Dvigateli iz Vysokoprochnogo Chuguna i Konstruktsionnoi Stali Napyleniem, Naplavkoi i Poverkhnostnym Plasticheskim Deformirovaniem*. [Technology for Restoration of Motor Crankshafts Made from High-Strength Cast-Iron and Constructional Steel while Using Spraying, Welding Deposition and Surface Plastic Deformation]. Minsk. 23 p. (in Russian)

Поступила 11.03.2015
Подписана в печать 01.06.2015
Опубликована онлайн 22.01.2016

REFERENCES

1. Lyalyakin V. P., Ivanov V. P. (2004) *Restoration and Strengthening of Machinery Parts in Agro-Industrial Complex of Russia and Belarus. Remont, Vosstanovlenie,*

Received: 11.03.2015
Accepted: 01.06.2015
Published online: 22.01.2016

УДК 621.745

Исследование работы ротационных наклоняющихся плавильных печей

Канд. техн. наук, доц. С. Л. Ровин¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Ротационные наклоняющиеся печи – новый тип топливных печей, обеспечивающих наиболее эффективный нагрев и переработку (рециклинг) полидисперсных материалов. В статье изложены результаты исследования тепловой работы ротационной наклоняющейся печи, движения материалов и газового неизотермического потока при вращении печи. Исследования выполнены на физической и компьютерной имитационных моделях, а также в реальных производственных условиях на опытно-промышленной установке. Результаты исследований послужили основанием для разработки рекомендаций по расчету и конструированию печей и использованы при проектировании ротационной наклоняющейся печи для нагрева и плавки чугуновой стружки, восстановительной плавки стальной прокатной окалины, переплавки отходов алюминия, плавки свинца из отходов аккумуляторного лома. Печи имеют высокий термический КПД (~50 %), технологическую гибкость, высокую удельную производительность и рентабельность. Апробированные технические решения при рециклинге черных и цветных металлов расширяют применение ротационной наклоняющейся печи в литейном и металлургическом производстве в качестве основного технологического агрегата при создании рентабельного малотоннажного рециклинга образующихся на предприятиях металлоотходов, открывают перспективу организации в Беларуси собственного производства высококачественных шихтовых материалов взамен импорта первичных металлов, позволяют решить важную экологическую задачу ликвидации многотонных отвалов металлосодержащих отходов.

Ключевые слова: ротационные наклоняющиеся печи, дисперсные материалы, процессы тепломассообмена, рециклинг металлоотходов

Для цитирования: Ровин, С. Л. Исследование работы ротационных наклоняющихся плавильных печей / С. Л. Ровин // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 1. С. 18–28

Investigations on Operation of Rotary Tilting Furnaces

S. L. Rovin¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Rotary tilting furnace (RTF) is a new type of fuel furnaces, that provide the most efficient heating and recycling of polydisperse materials. The paper describes results of the investigations on thermal processes in the RTF, movement of materials and non-isothermal gas flow during kiln rotary process. The investigations have been carried out while using physical and computer simulations and under actual operating conditions applying the pilot plant. Results of the research have served as a basis for development of recommendations on the RTF calculations and designing and they have been also used for constructional design of a rotary tilting furnace for heating and melting of cast iron chips, reduction smelting of steel mill scale, melting of aluminum scrap, melting of lead from battery scrap. These furnaces have a high thermal efficiency (~50 %), technological flexibility, high productivity and profitability. Proven technical solutions for recycling of ferrous and non-ferrous metals develop the use of RTF in the foundry and metallurgical industry as the main technological unit for creation of cost-effective small-tonnage recycling of metal waste generated at the plants. The research results open prospects for organization of its own production for high-quality charging material in Belarus in lieu of imported primary metal. The proposed technology makes it possible to solve environmental challenge pertaining to liquidation of multi-tonnage heaps of metal-containing wastes.

Keywords: rotary tilting furnace, disperse materials, processes of heat and mass transfer, recycling of metal-containing wastes

For citation: Rovin S. L. (2016) Investigations on Operation of Rotary Tilting Furnaces. *Science & Technique*. 15 (1), 18–28 (in Russian)

Адрес для переписки

Ровин Сергей Леонидович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 24,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-30-92
technolit@tut.by

Address for correspondence

Rovin Sergey L.
Belarusian National Technical University
24 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-30-92
technolit@tut.by

Введение

Плавка и термообработка полидисперсных материалов представляют большие трудности, так как традиционно применяемые в литейных цехах печи (индукционные, дуговые, отражательные) предназначены и успешно перерабатывают только плотные кусковые материалы. Если требуется переплавить дисперсные материалы, то, как правило, их окомковывают или брикетируют, агломерируют и т. п. Однако это не является достаточной компенсацией негативных последствий, которые вызывает использование такой низкокачественной шихты. Вместе с тем актуальность данной задачи возрастает, так как постоянно увеличиваются объемы дисперсных металлоотходов, к которым относятся стружка, окалина, аспирационная пыль, шламы и т. п. В Беларуси ежегодно образуется 450–500 тыс. т таких отходов, а в отвалах накоплено около 10 млн т. В то же время потребности белорусских предприятий в исходной металлошихте покрываются в основном за счет импорта.

Перспектива решения проблемы рентабельной переработки дисперсного сырья, или рециклинга металлоотходов, включая окисные и загрязненные, наметилась с появлением агрегатов нового типа – ротационных наклоняющихся печей (РНП), упоминания о которых появились в конце прошлого века. С 2000-х гг. первыми в Беларуси к их исследованию и разработке приступили специалисты БНТУ и ГГТУ имени П. О. Сухого. В настоящее время накоплен определенный опыт по конструированию и внедрению РНП в различных производственных условиях при рециклинге как цветных, так и черных металлоотходов. Полученные результаты и найденные принципиальные решения позволяют реализовать на базе РНП малотоннажный, эффективный, не требующий значительных инвестиций рециклинг дисперсных отходов без их предварительной обработки и подготовки [1].

Основные принципы работы ротационных печей

Для тепловой обработки полидисперсных материалов в настоящее время используются в основном вращающиеся печи. Это объясняется тем, что из-за малой площади контакта частиц дисперсный слой независимо от свойств

самого материала имеет весьма низкую теплопроводность. Как правило, теплопроводность слоя $\lambda_{\text{сл}}$ меньше теплопроводности материала $\lambda_{\text{м}}$ на два порядка и более, например для окалины в слое $\lambda_{\text{сл}} = 0,1\text{--}0,3$ Вт/(м·К), для частиц окалины $\lambda_{\text{ок}} = 56\text{--}123$ Вт/(м·К). Порозность слоя m «чешуек» окалины или стружки составляет $m = 0,4\text{--}0,6$ при насыпной плотности $\rho_{\text{сл}} = (1,2\text{--}2,0) \cdot 10^3$ кг/м³. Материал, находящийся в неподвижном слое, прогревается за счет конвекции от газового потока и излучением от газов и стен только на небольшую глубину (20–30 мм) [2].

Процесс передачи теплоты в стационарном слое отвечает граничным условиям I рода при решении уравнения Фурье [3]. Объемный коэффициент теплопередачи в поверхностном слое составляет $\alpha_v \approx 10^3$ кВт/(м³·К). Далее прогрев резко замедляется. Термический КПД (ТКПД) печи составляет в этих условиях $\eta = 0,05\text{--}0,07$, что является неудовлетворительным.

Динамичный пересыпающийся слой существенно глубже (до 50–80 мм) продувается газовым потоком, за счет чего интенсивность теплообмена повышается в 3–5 раз. Однако за счет малого времени пребывания и относительно низкой скорости газового потока во вращающихся барабанных проходных печах, а также низкого коэффициента заполнения рабочего пространства печи материалом $\phi = 0,08\text{--}0,12$, ТКПД таких печей составляет не более $\eta = 0,07\text{--}0,15$.

Оптимальное решение было найдено при организации «петлеобразного» движения газов в рабочем пространстве. Именно в этом и состоит одно из существенных преимуществ РНП. Принципиальное устройство РНП представлено на рис. 1а.

В РНП отвод газов производится с того же торца печи, на котором установлена горелка, т. е. вход и выход газов осуществляются через отверстия в крышке печи. Вращающийся корпус при загрузке устанавливается вверх горловиной под углом $12^\circ\text{--}18^\circ$ к горизонту, а при выпуске металла или шлака наклоняется вниз на $30^\circ\text{--}40^\circ$.

Вращение корпуса производится, как правило, с возможностью регулировки оборотов в диапазоне $n = 0,5\text{--}5,0$ об./мин. Опора крышки неподвижна, при загрузке и выгрузке печи (сливе металла и шлака) крышка отводится в сторону.

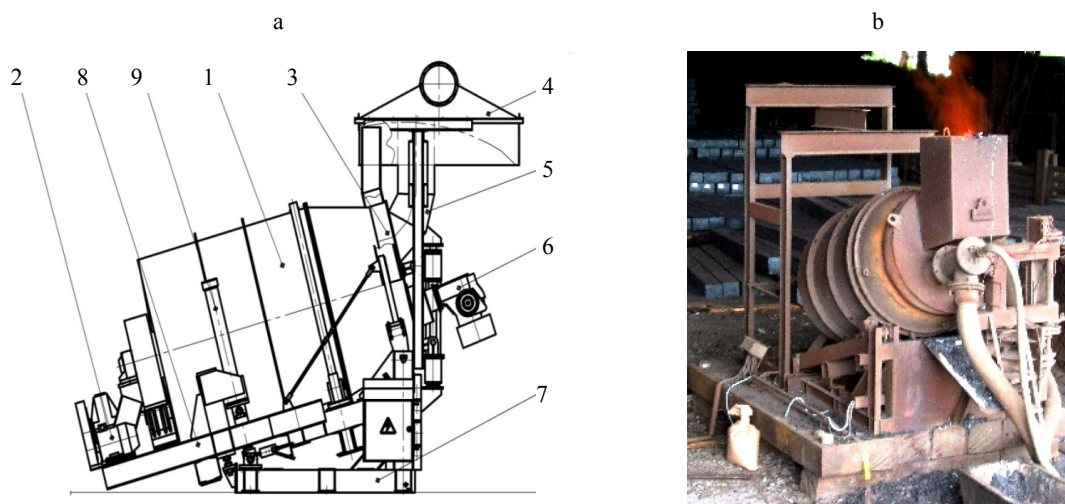


Рис. 1. Ротационная наклоняющаяся печь: 1 – корпус печи; 2 – привод вращения; 3 – поворотная крышка; 4 – зонт; 5 – дымоход; 6 – горелка; 7 – опорная рама; 8 – поворотная рама; 9 – привод наклона печи; а – общий вид РНП емкостью 1,5 т; б – опытно-экспериментальная РНП емкостью 0,5 т

Fig. 1. Rotary tilting furnace: 1 – furnace body; 2 – rotary drive; 3 – swinging cover; 4 – hood; 5 – smoke stack; 6 – burner; 7 – support frame; 8 – rotating frame; 9 – drive for furnace tilting; а – general view of 1.5t-capacity rotary tilting furnace (RTF); б – 0.5t-capacity experimental RTF

В РНП движение газов условно можно представить как турбулентный вращающийся «петлеобразный» поток. Линейные скорости газов во вращающемся потоке имеют значения, соответствующие скоростям потока в факеле горелки, а скорость поступательного движения потока определяется отношением расхода газа к половинному сечению рабочего пространства. Поступательная скорость потока значительно ниже вращательных скоростей, что увеличивает время пребывания газов в печи, а скорость вращательного движения обеспечивает высокую интенсивность конвективного теплообмена.

ТКПД РНП при нагреве дисперсных материалов, например стружки, в 2–3 раза превышает ТКПД барабанных печей, достигая 45–50 %. Большая горловина печи и возможность наклона последней позволяют значительно сократить время загрузки РНП шихтовыми материалами, слива расплава и скачивания шлака. Это в свою очередь сокращает продолжительность полного цикла плавки и повышает фактическую производительность печи [4].

Движение материала в печи

Движение дисперсного материала в ротационных печах определяется силами межчастичных связей (когезии), внутреннего трения в

слое, силами трения на границе «материал – футеровка», силами инерции (центробежными силами) и силой тяжести. Кроме того, на верхний слой частиц, особенно при обрушении, действуют аэродинамические силы скоростного потока газов.

Чем больше сцепление материала с поверхностью футеровки, тем выше поднимается материал при повороте печи и тем интенсивнее разрушается (сдвигается и обрушается) слой. В целом для понимания механики движения шихтовых материалов в ротационных печах может быть использована известная математическая модель, описывающая поведение материала в шаровой мельнице.

На частички, расположенные в непосредственной близости от поверхности барабана (рис. 2), действует радиальная сила N , возникающая от действия центробежной силы F_a и радиального вектора веса F_g [5]:

$$N = \frac{mv^2}{r} \pm mg \cos \alpha,$$

где m – масса частички; v – скорость частички; r – расстояние от оси вращения до частички; g – ускорение свободного падения; α – угол поворота радиуса, проведенного к рассматриваемой частичке, относительно вертикальной оси (угол подъема материала).

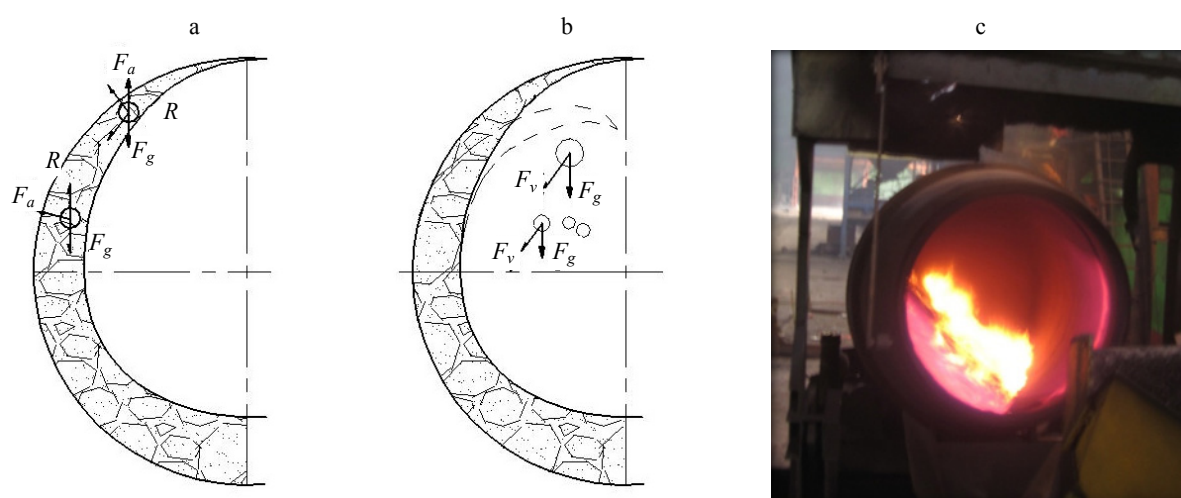


Рис. 2. Схема движения материалов во вращающейся печи: а – момент захвата материала; б – то же отрыва частиц; с – нагрев чугунной стружки в РНП (завод «Центролит», г. Гомель)

Fig. 2. Scheme of material movement in rotary tilting furnace: а – moment of material grasping; б – moment of particle disengagement; с – heating of cast iron chips in RTF (JSC “Tsentrolit”, Gomel)

Во время вращения барабана сила N вызывает реакцию R – трение между частицами материала и поверхностью барабана, в результате чего происходят «прилипание» частиц к поверхности барабана ($F_{тр} = R = NK_{тр}$), их подъем и ускорение.

С увеличением угла подъема материала радиальная компонента веса уменьшается и меняет знак, после того как частицы перейдут через горизонтальную ось ($\alpha = 90^\circ$, $\cos \alpha = 0$). В зависимости от скорости вращения раньше или позже частица теряет контакт с поверхностью барабана и по баллистической траектории падает вниз. Таким образом происходит перемешивание материала. При критической скорости v_k центробежная сила равна весу частицы. При такой скорости материал как бы прилипает к внутренней поверхности барабана.

Очень удобный способ для определения режимов, обеспечивающих максимально эффективное перемешивание материала в ротационных печах, предлагает равенство

$$v_k = \pi n D,$$

где n – скорость вращения корпуса; D – диаметр печи.

Поведение слоя материала сильно отличается от отдельно взятой частицы. Фактически критическая скорость зависит от степени наполнения печи и состава материала. Наиболее эффективные режимы соответствуют следующему диапазону угловых скоростей: при

плотной шихте $n = (6,5-12)D^{-0,5}$ [1], при «легком» скрапе $n = (10-27)D^{-0,5}$ [5].

В РНП к названным выше силам добавляется осевая сила. Это происходит благодаря углу наклона оси барабана к горизонтальной поверхности, что заставляет материал продвигаться по спирали к днищу печи и затем снова вперед к горловине. Дополнительные движения усиливают процессы перемешивания материала, что значительно увеличивает скорость прогрева слоя.

По мере того как температура повышается, в слое начинают преобладать сдвиговые деформации. Циркуляционный слой материала, образующийся при вращении печи, интенсивно прогревается потоком горячих газов и футеровкой. Конфигурация и объем этого слоя меняются с изменением адгезионных и когезионных свойств материала в процессе нагрева. При нагреве сектор, занимаемый дисперсным материалом, уменьшается, постепенно приближаясь к конфигурации, которую приобретает жидкость в подобных условиях.

Теплообмен в РНП

В ротационных печах передача теплоты осуществляется за счет радиации (от стен печи, факела и потока горячих газов), теплопроводности (от стен печи) и конвекции (от потока горячих газов). При этом решающую роль, безусловно, играет конвективный теплообмен.

Нагрев дисперсного материала в слое может быть описан параболой [6]

$$t = t_0(h+1)^n,$$

где t_0 – температура на поверхности слоя; h – текущая относительная толщина слоя; $n = k\alpha_V$, для дисперсных металлоотходов $n = 0,5-4,0$; α_V – объемный коэффициент теплопередачи, $\alpha_V = (1-3) \cdot 10^3$ Вт/(м³·К); k – эмпирический коэффициент, $k = (0,5-2,5) \cdot 10^{-3}$.

В начальной стадии нагрева в слое отмечаются достаточно высокие градиенты температур – до 1000–2000 К/м, что способствует его быстрому прогреву. Управляя скоростью вращения, можно изменять интенсивность перемешивания и тем самым интенсивность тепло- и массообмена, которая приближается к величине, характерной для печей с псевдоожиженным слоем. В этих условиях коэффициент теплопередачи α_V достигает значения $\alpha_V = 3000$ Вт/(м³·К), что на два порядка выше, чем при нагреве неподвижного слоя.

Проницаемость слоя дисперсного материала для газового потока определяется плотностью слоя и может быть охарактеризована критерием проточности. Проточность материалов с диаметром частиц $d = 0,2-5,0$ мм (окалина, мелкая стружка, песок и т. д.) соответствует критерию проточности K_p , лежащему в пределах 10^5-10^7 и соответственно коэффициенту объемной концентрации

$$\beta = \frac{V_{\text{ч}}}{V_{\text{сл}}} \approx 0,3-0,65,$$

где $V_{\text{ч}}$ – объем, занятый частицами в слое; $V_{\text{сл}}$ – объем слоя.

Эти параметры относятся к подвижному верхнему слою материала. В общем случае интенсивность межфазного переноса для продуваемого слоя связана с размером частиц соотношением

$$\alpha_V = \alpha(1 + 0,2\text{Bi})^{-1},$$

где α – внешний коэффициент теплообмена; $\text{Bi} = \alpha d / \lambda$ – критерий Био; λ – коэффициент теплопроводности материала.

При уменьшении скорости потока газов, омывающего частицы в слое, и размеров частиц турбулентность потока снижается ($\text{Re} \rightarrow 0$). А так как критерий Нуссельта является функцией от числа Рейнольдса [6], соответственно снижается и интенсивность нагрева α

$$\text{Nu} = \frac{\alpha d}{\lambda_r} = f(\text{Re}),$$

где λ_r – теплопроводность газов; d – диаметр частиц.

При этом, однако, сохраняется высокая степень неоднородности потока, поэтому даже в глубине динамического слоя $\text{Nu} \gg \text{Nu} = f(\text{Re}_0)$. Сохраняется и концентрационный напор на реакционной поверхности частиц.

Нагрев верхнего динамического слоя материала в ротационной печи может быть рассчитан по модифицированному уравнению нестационарной теплопроводности, где вместо коэффициента теплопроводности слоя $\lambda_{\text{сл}}$ используется произведение αd , рассчитанное для отдельных частиц продуваемого слоя. Для одномерной схемы в этом случае можно записать

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{\alpha d}{c\rho} \frac{d^2 t}{dx^2},$$

где t – температура слоя; x – высота (толщина) слоя.

Для верхней продуваемой части слоя $\alpha_V \approx 1-3$ кВт/(м³·К), для внутренних слоев $\alpha_V \approx 10-30$ Вт/(м³·К) при тех же диаметрах $d \leq 5$ мм.

Максимальная интенсивность нагрева дисперсного материала достигается во взвешенном состоянии (в кипящем слое). В таких условиях время нагрева частицы, например чешуйки окалины или песчинки, составляет примерно 0,004–0,100 с. Однако на практике режим кипящего слоя используется только для монодисперсных материалов.

Во вращающихся печах, где имеет место механическое перемешивание материала, тепло- и массообмен зависят от соотношения толщин внешней динамической и неподвижной внутренней частей слоя. Толщину продуваемого слоя можно определить по сопротивлению Δp_c , которое не должно быть больше скоростного напора потока газов в печи. Для потока газов, движущихся со скоростью $v_r = 13-15$ м/с, можно записать

$$\Delta p_c \leq \frac{136 v_r^2 \rho_r}{273 - t},$$

где v_r , ρ_r – скорость и плотность газового потока.

Таким образом, передача теплоты и интенсивность прогрева слоя материала за счет кон-

векции тем выше, чем больше скорость движения газа-теплоносителя, турбулентность потока и интенсивнее перемешивание самого слоя. Для РНП толщина продуваемого слоя составляет 50–80 мм.

Движение газового потока в печи

Одним из эффективных инструментов при исследовании аэродинамических и теплообменных процессов, протекающих в условиях высоких градиентов температур и скоростей, является применение прикладных программных комплексов (ППК), таких как ANSYS и Solid Works Flow Simulation [7, 8]. Движение газового потока описывается при этом с помощью систем уравнений Навье – Стокса для реальных неизотермических потоков, уравнений неразрывности, сохранения энергии и состояния, а изменения температуры – в соответствии с уравнением Фурье – Кирхгофа [3, 6]. Тепловой баланс проверяется путем совместного решения для тех же исходных данных уравнения Фурье с граничными условиями III и IV рода для динамического слоя материала, при замене коэффициента теплопроводности λ на приведенный коэффициент теплопередачи α_k для продуваемого слоя.

Для решения системы уравнений принимаются следующие допущения: фазовое состояние материала не изменяется, характер движения газового потока турбулентный, газ сжимаемый. Уравнение неразрывности с учетом нагрева газа (для двумерной задачи) может быть записано в следующем виде:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial (\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v_y)}{\partial y} = 0,$$

где v_x, v_y – компоненты вектора скорости в направлениях x, y ; ρ – плотность газового потока.

Алгоритм сжимаемого течения применяется для стабилизации параметров при использовании сложной геометрии и сгущения конечно-элементной сетки в местах экстремальных значений температур и скоростей в связи с тем, что рабочие объемы газа-теплоносителя уменьшаются пропорционально температурному бинному $1 + \alpha t$, где $\alpha = 1/273$. Уравнение сохранения энергии с учетом теплопереноса может быть записано в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho c_p t_0) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho v_x c_p t_0) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v_y c_p t_0) =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial t_0}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial t_0}{\partial y} \right) + W^v + E^k + \frac{\partial P}{\partial \tau},$$

где c_p – удельная теплоемкость; t_0 – температура поверхности; $K = a_{пр}$, $a_{пр}$ – приведенный коэффициент температуропроводности; W^v – работа сил вязкости; E^k – кинетическая энергия.

Статическая температура вычисляется из общей температуры и кинетической энергии

$$t = t_0 - \frac{v^2}{2c_p},$$

где t – статическая температура; v – вектор скорости газа.

Статическая и полная температуры для узлов, формирующих твердые элементы модели, равны.

Кинетическая энергия записывается формулой

$$E^k = -\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{K}{c_p} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} v^2 \right) \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{K}{c_p} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{2} v^2 \right) \right].$$

Мгновенные скорости в любой точке нестационарного (флуктуационного) потока изменяются как по абсолютному, так и по векторному значениям. Скорость при этом

$$v_x = \bar{v}_x + v'_x,$$

где $\bar{v}_x$ – средний компонент скорости в направлении x ; v' – флуктуационный компонент скорости в направлении x .

Уравнение для кинетической энергии может быть записано следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho K}{\partial \tau} + \frac{\partial (\rho v_x K)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v_y K)}{\partial y} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial K}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial K}{\partial y} \right) + \frac{C_4 \mu_t}{\sigma_1} \left(g_x \frac{\partial t}{\partial x} + g_y \frac{\partial t}{\partial y} \right), \end{aligned}$$

где σ_k, C_4 – постоянные в k - ϵ -модели турбулентности; σ_t – число Шмидта; μ_t – вязкость потока, обусловленная турбулентностью.

Численное моделирование аэродинамических процессов проводили с учетом химических реакций горения топлива. Расчетная область представляет собой рабочее пространство печи с полной загрузкой, отапливаемое газовой воздушной горелкой. Основным топливом яв-

лялся метан, в качестве окислителя применялся воздух в соотношениях 1/10.

Моделирование можно разбить на два этапа: на первом определяли расположение горелки, для этих целей использовали ППК Solid Works Flow Simulation. На втором этапе моделировали процесс горения и движения газового потока в ротационной печи, для данной задачи выбрали программный комплекс ANSYS CFX.

Результатами численного моделирования являются поля температур, скоростей, давлений, траектории движения потока, концентрации топлива, окислителя, продуктов реакций, а также конвективные и лучистые потоки. Для исследования тепло- и массообменных процессов в РНП создали трехмерную модель ротационной печи с использованием ППК Solid Works 14.0. С помощью ANSYS Meshing эту модель разбили на сетку конечных элементов – 290665 элементов (рис. 3). Для моделирования турбулентных течений упомянутые уравнения Навье – Стокса усредняются по Рейнольдсу, т. е. используется усредненное по малому масштабу времени влияние турбулентности на параметры потока, а крупномасштабные временные изменения усредненных по малому масштабу времени составляющих газодинамических параметров потока (давления, скоростей, температуры) учитываются введением соответствующих производных по времени.

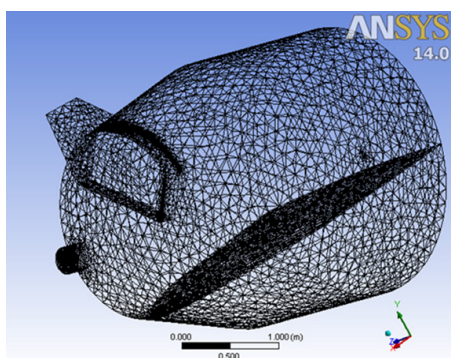


Рис. 3. Расчетная сетка ротационной печи

Fig. 3. Computational grid of rotary furnace

Система уравнений сохранения массы, импульса и энергии нестационарного пространственного течения в декартовой системе координат (x_i , $i = 1, 2, 3$), вращающейся с угловой скоростью Ω вокруг оси, проходящей через ее начало, имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k) = 0;$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial}{\partial x_i} = S_i;$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} ((\rho E + p) u_k + q_k) - \tau_{ik} u_i = S_k u_k + Q_H,$$

где τ – время; u – скорость потока; ρ – плотность потока; p – давление потока; S_i – внешние массовые силы; E – полная энергия единичной массы потока; Q_H – теплота, выделяемая источником в единичном объеме потока; τ_{ik} – тензор вязких сдвиговых напряжений; q_i – диффузионный тепловой поток; нижние индексы в формулах означают суммирование по трем координатным направлениям.

Наряду с моделированием процесса диффузии теплоты в текучей (газовой) среде моделируется также теплопередача в твердых телах с помощью уравнения Фурье

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q_H,$$

где $e = cT$; c – удельная теплоемкость; T – температура; λ – теплопроводность; Q_H – удельное тепловыделение.

Конвективный теплообмен моделируется в пограничном слое текучей среды между поверхностями твердых тел и этой средой.

При радиационном теплообмене учитывается только суммарное излучение. В итоге излучаемая с единицы поверхности теплота согласно закону Стефана – Больцмана определяется как [9]

$$Q_R = \varepsilon \sigma_0 T_W^4,$$

где ε – степень черноты поверхности; σ_0 – постоянная Стефана – Больцмана; T_W – температура поверхности.

Для дискретизации дифференциальных уравнений используется метод конечных объемов (элементов). Собственно дискретизация рассмотренной непрерывной математической модели состоит в том, что значения физических переменных рассчитываются в центрах расчетных элементов, а на их границах определяются потоки массы, импульса, энергии, необходимые

для нахождения этих значений. Пространственные производные аппроксимируются с помощью неявных разностных операторов второго порядка точности. Поток рассчитывается с использованием их аппроксимаций второго порядка и метода минимизации полной вариации.

Результаты моделирования движения газового потока в рабочем пространстве РНП при

различных вариантах установки горелок представлены на рис. 4–7. На рис. 4, 5 видно, что факел горячих газов, встречаясь со слоем материала на входе в печь, отклоняется, образуя многочисленные вихри. Слой, прилегающий к крышке печи, прогревается меньше, чем у дна корпуса, кроме того, образующиеся вихревые потоки препятствуют проникновению нагретого потока в глубь материала.

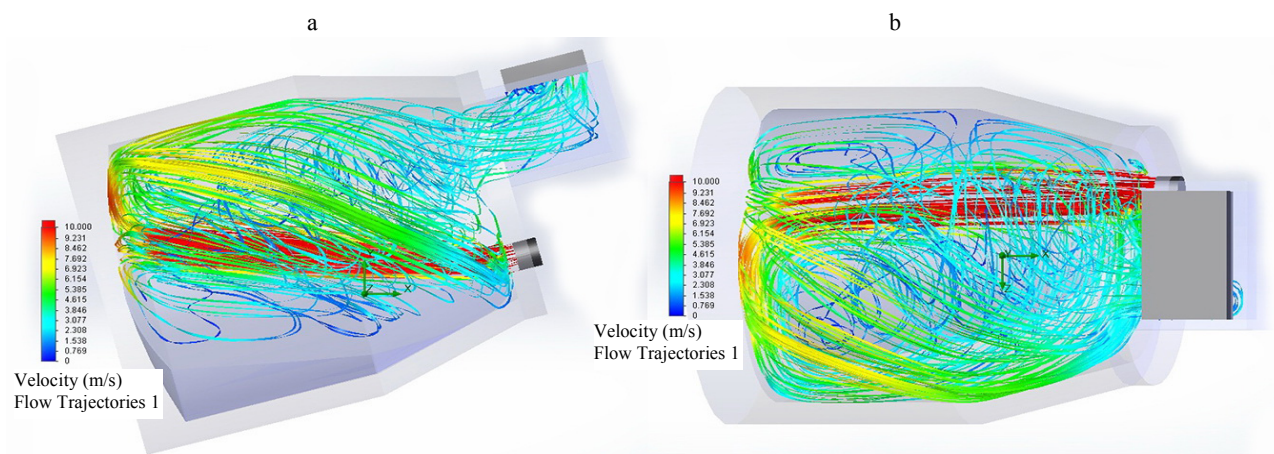


Рис. 4. Траектории движения и скорости потоков при расположении горелки справа:
а – вертикальное сечение печи; б – горизонтальное сечение

Fig. 4. Trajectories of motion and flow rates with burner in right position:
а – vertical section of furnace; б – horizontal section

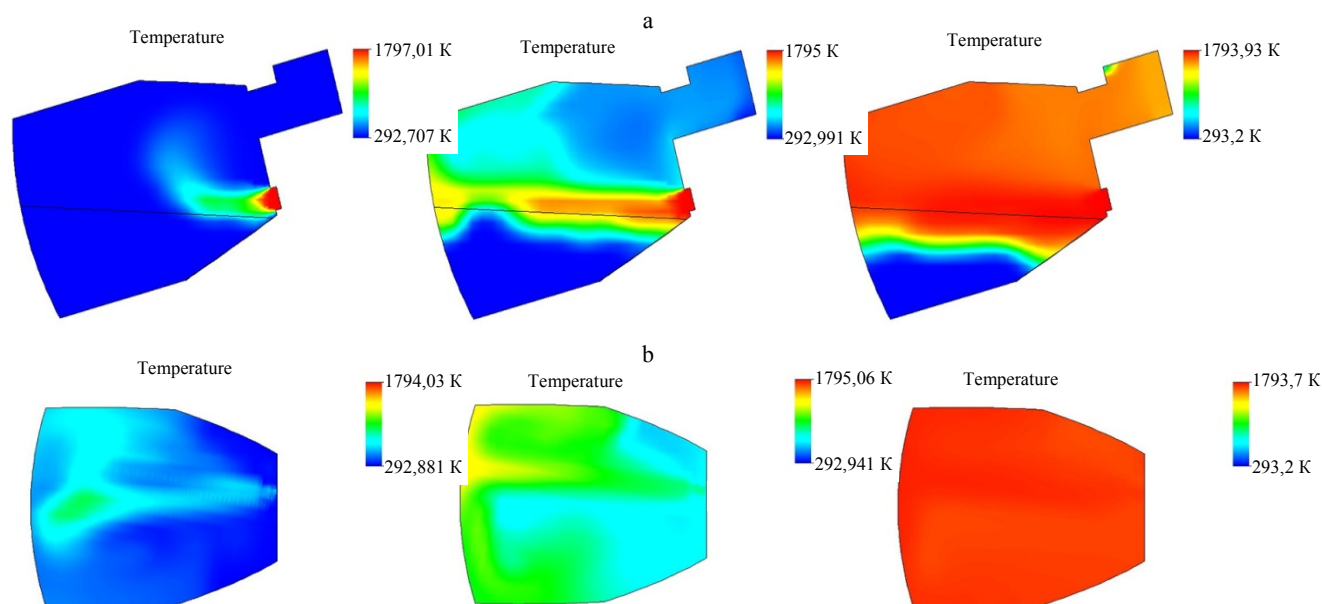


Рис. 5. Распределение температур в ротационной печи, горелка справа:
а – вид сбоку – распределение температур по сечению печи, совпадающему с осью горелки;
б – вид сверху – распределение температур на поверхности шихты

Fig. 5. Distribution of temperature in rotary furnace with burner in right position:
а – side-view – distribution of temperature according to furnace section which lies in burner axis;
б – top-view – distribution of temperature on furnace charge surface

Наиболее рациональным при заданном направлении вращения печи (против часовой стрелки) является расположение газозвушной горелки внизу слева, т. е. со стороны, где слой материала минимален. При этом пламя практически не испытывает никакого сопротивления со стороны материала, обеспечивается максимальная настильность пламени, поток по дуге омыва-

ет всю поверхность материала, максимально передавая теплоту и проникая глубоко в слой между его частицами (рис. 6, 7). Такое расположение горелки позволяет повысить эффективность теплообменных процессов и соответственно сократить продолжительность цикла плавки в целом. Результаты моделирования структуры потока представлены на рис. 8.

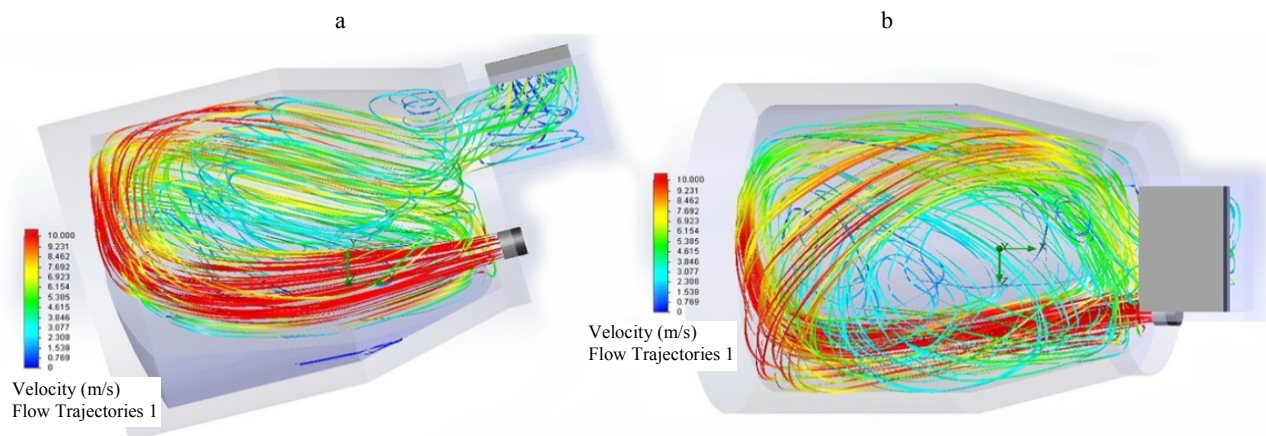


Рис. 6. Траектории движения и скорости потоков при расположении горелки слева:
а – вертикальное сечение печи; б – горизонтальное сечение

Fig. 6. Trajectories of motion and flow rates with burner in left position:
a – vertical section of furnace; b – horizontal section

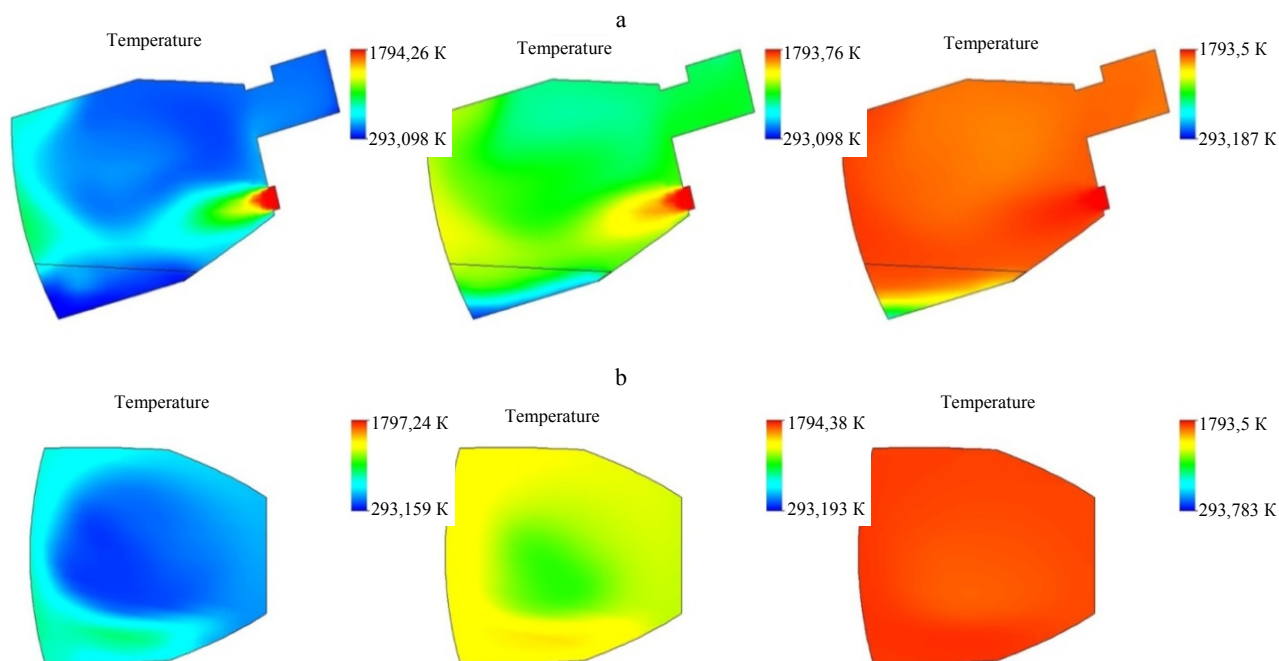


Рис. 7. Распределение температур в ротационной печи, горелка слева:
а – вид сбоку – сечение по горелке; б – вид сверху – распределение температур на поверхности шихты

Fig. 7. Distribution of temperature in rotary furnace with burner in left position:
a – side-view – section according to burner; b – top-view – distribution of temperature on furnace charge surface

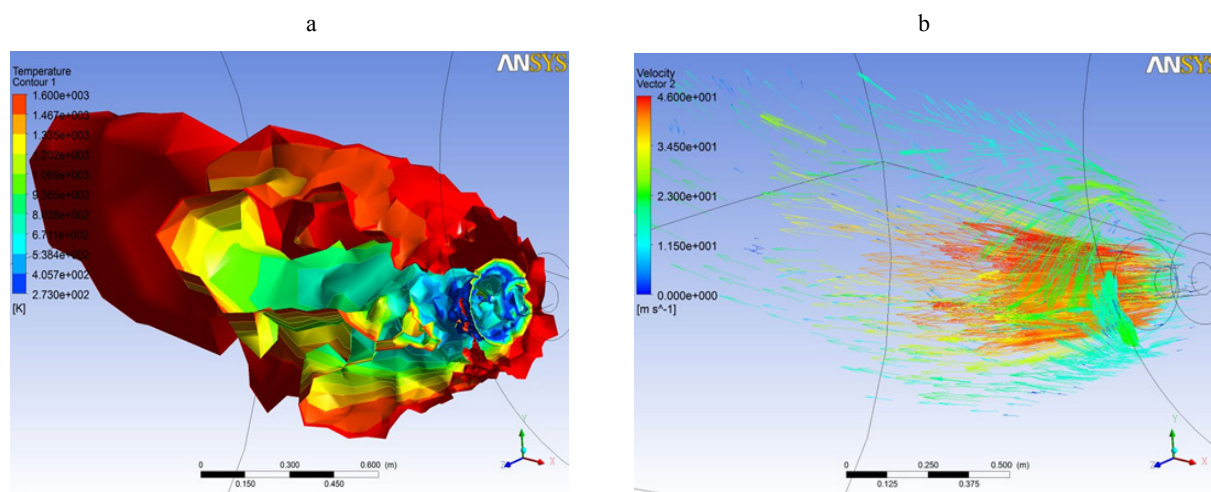


Рис. 8. Структура газовоздушного потока на выходе из горелки:
а – структура турбулентного потока; б – вектор скоростей на выходе из горелки

Fig. 8. Structure of gas air flow on exit from burner:
а – structure of turbulent flow; б – velocity vector on exit from burner

Для отработки технологии рециклинга создали опытно-промышленную РНП емкостью 500 кг. Процессы тепло- и массообмена осуществляются в РНП в условиях высокой интенсивности взаимодействия реагентов. Так, весь процесс плавки чугунной стружки занимает не более 40–45 мин. Процесс восстановления прокатной окалины от загрузки шихты до получения жидкого металла в РНП занял около 3 ч, в то время как процессы только твердофазного восстановления в известных агрегатах требуют для получения металлизированных окатышей (губчатого железа) до 20 ч и более [10].

На основе полученных данных разработаны рекомендации по технологии рециклинга и конструированию печей емкостью от 0,5 до 7,0 т по жидкому металлу для плавки и тепловой обработки металлоотходов. Внедрение в производство и опыт эксплуатации РНП различного назначения доказали высокую эффективность этих агрегатов при переработке дисперсных материалов.

ВЫВОДЫ

1. Разработка и совершенствование ротационных наклоняющихся печей и технологических процессов их использования для рециклинга низкосортных дисперсных металлоотходов позволяют без предварительной подготовки

с применением практически любых восстановителей и любого топлива перерабатывать отходы в местах их образования и получать высококачественные шихтовые материалы и/или литейные сплавы.

2. В масштабах Беларуси переработка только вновь образующихся отходов такого рода обеспечит ежегодный возврат в производство до 150 тыс. т чугуна и стали. Учитывая расчетную стоимость получаемого металла (150–200 тыс. дол. за 1 т), рентабельность производственных участков по переработке собственных дисперсных металлоотходов, организованных на металлургических и машиностроительных предприятиях, составит не менее 50–75 %, а возврат инвестиций – не более 9–12 месяцев. Производственная мощность таких участков может составлять от одной-двух до десятков тысяч тонн перерабатываемых отходов в год.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ровин, С. Л. Восстановление оксидов железа в ротационных печах / С. Л. Ровин, Л. Е. Ровин, Т. М. Заяц // Литье и металлургия. 2011. № 1. С. 38–45.
2. Лисиенко, В. Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление, экология / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелочков, М. Г. Ладыгичев. М.: Теплотехник, 1986. 544 с.
3. Металлургическая теплотехника: в 2 т / В. А. Кривандин [и др.]; под ред. В. А. Кривандина. М.: Металлургия, 1986. Т. 1. 486 с.

4. Ровин, С. Л. Использование ротационных печей для рециклинга железосодержащих отходов / С. Л. Ровин // Литье и металлургия. 2014. № 1. С. 56–61.
5. Шмитц, К. Роторно-поворотная барабанная печь: современная технология в производстве вторичного алюминия / К. Шмитц // Металлургическое производство и технология металлургических процессов. 2006. № 1. С. 30–41.
6. Зобнин, Б. Ф. Теплотехнические расчеты металлургических печей / Б. Ф. Зобнин, М. Д. Казяев, Б. И. Китаев. Минск: Металлургия, 1982. 360 с.
7. Solid Works. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский [и др.]. СПб.: БВХ-Петербург, 2005. 800 с.
8. Sonavane, Y. Numerical Analysis of the Heat Transfer in the Wall of Rotary Kiln Using Finite Element Method ANSYS / Y. Sonavane, E. Specht. Germany: Magdeburg, 2009. 186 p.
9. Блох, А. Г. Теплообмен излучением / А. Г. Блох, Ю. А. Журавлева, Л. Н. Рыжкова; под ред. А. Г. Блоха. М.: Энергоатомиздат, 1991. 432 с.
10. Юсфин, Ю. С. Металлургия железа / Ю. С. Юсфин, Н. Ф. Пашков. М.: Академкнига, 2007. 464 с.

Поступила 25.02.2015

Подписана в печать 24.04.2015

Опубликована онлайн 22.01.2016

REFERENCES

1. Rovin S. L., Rovin L. E., Zayats T. M. (2011) Restoration of Iron Oxides in Rotary Kilns. *Litiyo i Metallurgiya* [Foundry and Metallurgy], (1), 38–45 (in Russian).
2. Lisienko V. G., Shchelokov Ya. M., Ladygichev M. G. (1986) *Rotary Kilns: Heat Engineering, Control, Ecology*. Moscow, Teplotekhnika. 544 p. (in Russian).

3. Krivandin V. A., Arutiunov V. A., Mastriukov B. S., Sborshchikov G. S., Egorov A. V., Kobakhidze V. V., Filimonov Iu. P., Shteingardt Rolf. (1986) *Metallurgical Heat Engineering. Vol. 1*. Moscow, Metallurgiya. 486 p. (in Russian).
4. Rovin S. L. (2014) Usage of Rotary Kilns for Recycling of Iron-Containing Wastes. *Litiyo i Metallurgiya* [Foundry and Metallurgy], (1), 56–61 (in Russian).
5. Shmits K. (2006) Rotary Tilting Drum Furnace: Modern Technology in Production of Secondary Aluminium. *Metallurgicheskoye Proizvodstvo i Tekhnologiya Metallurgicheskikh Protsessov* [Metallurgical Production and Technology of Metallurgical Processes], (1), 30–41 (in Russian).
6. Zobnin B. F., Kazyayev M. D., Kitaev B. I. (1982) *Thermotechnical Calculations for Metallurgical Furnaces*. Minsk, Metallurgiya. 360 p. (in Russian).
7. Alyamovsky A. A., Sobachkin A. A., Odintsov E. V., Kharitonovich A. I., Ponomarev N. B. (2005) *Solid Works. Computer Simulation in Engineering Practice*. Saint-Petersburg, BVKh-Petersburg. 800 p. (in Russian).
8. Sonavane Y., Specht E. (2009) *Numerical Analysis of the Heat Transfer in the Wall of Rotary Kiln Using Finite Element Method ANSYS*. Germany, Magdeburg. 186 p.
9. Blokh A. G., Zhuravlyova Yu. A., Ryzhkova L. N. (1991) *Radiation Heat Transfer*. Moscow, Publishing House "Energoatomizdat". 432 p. (in Russian).
10. Yousfin Yu. S., Pashkov N. F. (2007) *Iron Metallurgy*. Moscow, Publishing and Booksellers Centre "Akademkniga". 464 p. (in Russian).

Received: 25.02.2015

Accepted: 24.04.2015

Published online: 22.01.2016

УДК 629.3.014

Определение передаточных отношений механической части электромеханической трансмиссии трактора

Канд. техн. наук, доц. Ч. И. Жданович¹⁾, инж. Н. В. Калинин¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Разработана методика для выбора числа передач и передаточных отношений передач механической части трансмиссии для колесного трактора с электромеханической трансмиссией, содержащей тяговый асинхронный электродвигатель с частотным управлением. Предлагается определить передаточное отношение исходя из: обеспечения зависимости момента на колесах от скорости движения трактора, наилучшим образом подходящей для тяги, в том числе и на участке перехода с одной передачи на другую; обеспечения номинального режима работы электродвигателя для всех операций трактора, на которых он работает продолжительное время; обеспечения минимально возможного количества передач; полной реализации мощности двигателя внутреннего сгорания на колесах трактора на предельном режиме работы электродвигателя. Поскольку характеристика асинхронного электродвигателя с частотным регулированием содержит различные участки, которые в зависимости от условий движения могут быть полностью или частично использованы, число передач определяется в процессе нахождения передаточных отношений, а не заранее. Момент на колесах трактора с электромеханической трансмиссией может быть ограничен: по сцеплению колес с опорной поверхностью, по максимальной мощности двигателя внутреннего сгорания, которая может передаваться на колеса, и моментом, развиваемым тяговым электродвигателем. Для всех операций трактора, на которых он работает продолжительное время, предлагается не превышать номинальный режим работы тягового электродвигателя, поскольку длительная работа при значительном превышении номинального режима работы асинхронного электродвигателя приведет к низкой эффективности и высоким потерям мощности, большому выделению теплоты и как следствие к необходимости разрабатывать более сложную систему охлаждения электродвигателя. Для работы в непродолжительных режимах может быть обоснованное превышение номинального момента электродвигателя, чтобы не выбирать более мощный электродвигатель или не делать дополнительную передачу в коробке.

Ключевые слова: момент, передаточное отношение, режим работы, теоретическая скорость, трансмиссия, тяговый асинхронный электродвигатель, характеристика, число передач

Для цитирования: Жданович, Ч. И. Определение передаточных отношений механической части электромеханической трансмиссии трактора / Ч. И. Жданович, Н. В. Калинин // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 1. С. 29–36

Determination of Transmission Gear Ratio in Mechanical Part of Tractor Electro-Mechanical Transmission

Ch. I. Zhdanovich¹⁾, N. V. Kalinin¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. A methodology has been developed for selection of gear number and transmission gear ratios in mechanical part of a wheel-type tractor with electro-mechanical transmission containing a propulsion asynchronous electric motor with variable-frequency control. The paper proposes to determine a transmission gear ratio on the basis of the following: provision of wheel torque dependence on tractor speed which is the best one for a traction process and during transfer from one gear to the other; provision of nominal operational mode of the electric motor for all tractor operations where it is working for a long period of time; provision of minimum possible number of gears; complete realization of internal combustion engine power on the

Адрес для переписки

Калинин Никита Владимирович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-82-05
avto_atf@bntu.by

Address for correspondence

Kalinin Nikita V.
Belarusian National Technical University
12 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-82-05
avto_atf@bntu.by

tractor wheels at limit operational mode of the electric motor. As a characteristic of the asynchronous electric motor with variable-frequency control contains various portions which can be used either completely or partially due to operating conditions, the gear number is determined in the process of transmission gear ration finding but not prior to this. A wheel torque of the tractor with electro-mechanical transmission can be limited according to the following factors: grip of wheel with supporting surface; maximum power of an internal combustion engine which can be transferred to the wheels and a torque which is developed by a propulsion electric motor. It is not proposed to exceed nominal operational mode of the propulsion electric motor for all the operations of the tractor if it is working for a long period of time because in the case of significant excess of the nominal operational mode of the asynchronous electric motor its rather long operation leads to low efficiency and high losses in power, large heat liberation and consequently requires to develop more complicated system for electric motor cooling. An excess of nominal electric motor torque can be justified for short-term operational modes because in this case there is no need to select more powerful electric motor and create an additional gear in the gear-box.

Keywords: torque, transmission gear ratio, operational mode, theoretical speed, transmission, propulsion asynchronous electric motor, characteristics, gear number

For citation: Zhdanovich Ch. I., Kalinin N. V. (2016) Determination of Transmission Gear Ratio in Mechanical Part of Tractor Electro-Mechanical Transmission. *Science & Technique*. 15 (1), 29–36 (in Russian)

Введение

Для транспортных средств, колеса которых приводятся во вращение от тягового электродвигателя (например, троллейбус, трамвай), переключение передач, как правило, не используется, поскольку возможности электродвигателя позволяют развить высокий момент (в 2–3 раза больше номинального), а для движения с высоким КПД достаточно поддерживать определенную скорость. Колесный трактор с электро-механической трансмиссией в отличие от таких транспортных средств используется для различных режимов работы [1, с. 69], для каждого из которых установлен определенный диапазон скоростей движения. Например, трактор 5-го класса при работе с отвалом бульдозера должен развивать скорость 2,5–4,0 км/ч [2, с. 19], при работе на пахоте используются плуги [3], требующие скорости 8–11 км/ч, а при работе на транспортном режиме скорость может достигать максимальных значений (около 36 км/ч [4]). Электродвигатель (ЭД) не может дать высокий КПД в таком широком диапазоне частоты вращения и нагрузки, по этой причине необходимо обеспечить возможность изменения передаточного отношения механической части трансмиссии.

Электродвигатель обладает определенной характеристикой, которая зависит от типа применяемого ЭД и способа управления им; при этом характеристика на номинальном и предельно возможном режимах работы будет разной. При учете высокой перегрузочной способности ЭД можно значительно уменьшить число

передач, подобрав передаточное отношение исходя из обеспечения продолжительных режимов работы при номинальном режиме, не требуя работы ЭД в номинальном режиме для непродолжительных предельных режимов работы трактора (разгон, преодоление препятствия и т. д.). По этой и другим причинам известные методики расчета передаточных отношений передач для ступенчатой механической трансмиссии не являются приемлемыми для электро-механической трансмиссии. Предлагается методика выбора передаточных отношений, учитывающая особенности ЭД и электро-механической трансмиссии, а также свойства опорной поверхности.

Определение передаточных отношений и числа передач для трактора с тяговым асинхронным двигателем с частотным управлением

Рассмотрим тяговый асинхронный двигатель (ТАД) трактора, регулируемый изменением напряжения и частоты напряжения обмотки статора согласно [5]. При номинальном скольжении s_n , номинальном напряжении и номинальной частоте питающего напряжения $f_{1,n}$ ТАД разовьет номинальный момент (рис. 1, точка N). Механическую характеристику ТАД, полученную при его номинальном скольжении s_n , как и в [5], будем считать номинальной (при отклонении f_1 от $f_{1,n}$ оптимальным будет режим при постоянном скольжении [6, с. 442–445]), а при критическом скольжении $s_{кр}$ – предельной (при $s_{кр}$ момент будет максимальным [7, с. 166]). При построении механической характеристи-

ки ТАД согласно [5] при s_n получим три участка характеристики (рис. 1, график 1): участок ND – при изменении частоты f_1 питающего напряжения от номинального $f_{1,n}$ до максимального $f_{1,max}$ значения; мощность ТАД при s_n практически постоянна; участок NB – от $f_{1,n}$ до $f_{1,lim}$ (при дальнейшем понижении частоты менее $f_{1,lim}$ момент начнет падать согласно [5]); момент практически постоянен; участок AB – от $f_{1,lim}$ до минимального значения; с падением f_1 уменьшаются и мощность, и момент. Точке N соответствует частота $f_{1,n}$, B – $f_{1,lim}$, D – $f_{1,max}$. Зависимость частоты вращения n_2 ротора ТАД от f_1 находится согласно [9, (3)], момент M ТАД – согласно [8]. При $s_{кр}$ вид характеристики будет несколько отличаться (рис. 1, график 2): частоте $f_{1,max}$ соответствует точка D' ; $f_{1,n}$ – точка N' ; $f_{1,lim}$ – точка B' ; точка A' соответствует минимальному значению частоты. Отличие формы графика 2 от формы графика 1 объясняется тем, что $s_{кр}$ зависит от f_1 [5], поэтому для каждой точки графика 2 будет разным, в то время как s_n берется постоянным для каждой точки графика 1.

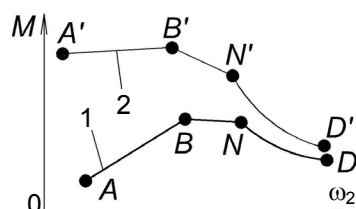


Рис. 1. Характеристика ТАД при скольжении:
1 – номинальном; 2 – критическом

Fig. 1. Traction induction motor speed torque curve:
1 – rated slip; 2 – slip for maximum torque

Необходимо учитывать, что момент ТАД может быть ограничен моментом по сцеплению и моментом по мощности двигателя внутреннего сгорания (ДВС) [9]. Для того чтобы можно было сразу определить, обеспечиваются или нет требуемые условия движения, рекомендуется строить характеристику зависимости момента M_k на колесах от скорости движения (действительной v_d или теоретической v_t), где момент на колесах определяется в зависимости от момента ТАД, а скорость движения – от частоты вращения ТАД [9].

Следует определить, какой именно участок механической характеристики ТАД применить для работы на той или иной передаче. Для меньшего количества передач в коробке желательно использовать как можно больший участок механической характеристики ТАД.

Характеристика $M_k(v_t)$ при s_n будет наилучшей, если при уменьшении скорости движения трактора момент станет возрастать. В этом случае при увеличении дорожного сопротивления скорость уменьшится и момент возрастет, поэтому будет обеспечиваться устойчивое движение [10, с. 92]. Такой вид характеристики $M_k(v_t)$ для какой-либо передачи в отдельности отличается при использовании участка ND механической характеристики ТАД (рис. 1). По этой причине для высшей (n -й) передачи берется полностью участок ND . Передаточное отношение n -й передачи $i_{тр,В1}$ определяется исходя из обеспечения максимальной скорости движения трактора при $f_{1,max}$. Если для данного участка характеристики момент ТАД слишком мал, то это значит, что нужно подбирать ТАД большей мощности.

Формулу для определения $i_{тр,В1}$ получим из [9, (7), (8)]

$$i_{тр,В1} = \frac{7,2\pi r_d f_{1,max}}{v_{t,max} p_1} (1-s) = \frac{7,2\pi r_d f_{1,max}}{v_{d,max} p_1} (1-s)(1-\delta), \quad (1)$$

где r_d – динамический радиус качения колеса, м; δ – коэффициент буксования; p_1 – число пар полюсов ТАД; s – скольжение ТАД; $v_{t,max}$, $v_{d,max}$ – максимальная теоретическая и действительная скорости движения трактора.

По той же причине при переключении с высшей на низшую передачу был бы наилучшим вариант, показанный на рис. 2а: передачи плавно переключаются в точке C и обеспечивается наиболее подходящий вид характеристики $M_k(v_t)$. Однако если взять только участок ND характеристики для работы на n -й и весь участок ND для работы на $(n-1)$ -й передаче, то может получиться вид характеристики аналогично рис. 2б, когда при переключении на более низшую передачу момент резко падает. Если такое случится при работе на предельной

характеристике, то трактор при скорости движения, соответствующей точке C , не сможет при разгоне развить момент, который может быть обеспечен характеристикой $M_k(v_r)$ при работе трактора на n -й передаче, поскольку уже после точки C' при работе на $(n-1)$ -й передаче момент начнет уменьшаться. При работе на номинальной характеристике можно при движении от C' до C увеличить скольжение ТАД, но тогда характеристика уже не будет номинальной. Можно на n -й передаче полностью или частично использовать участок NB : тогда переключение произойдет аналогично кривой на рис. 2с.

Случаи переключения передач при различных передаточных отношениях $(n-1)$ -й передачи (характеристики работы трактора на $(n-1)$ -й передаче представлены в виде графиков 1, 2, 3; самое большое передаточное отношение – для кривой 3, самое малое – для кривой 1) и одном и том же передаточном отношении n -й передачи (характеристика работы трактора на n -й передаче представлена в виде графика 4) рассмотрены на рис. 3.

Чтобы выдержать условие устойчивого движения, переключение необходимо выполнять в точке C_1' для первой кривой и в C_2' – для второй; максимальная частота питающего напряжения будет соответствовать точкам $C_2^{(1)}$ и $C_2^{(2)}$. При одной и той же скорости кривая 1 обеспечивает наибольший момент, но при этом диапазон на $(n-1)$ -й передаче сужается, поскольку согласно условию устойчивого движения переключение должно выполняться в точке C_1' . Кривая 3 обеспечивает наиболее широкий диапазон работы на $(n-1)$ -й передаче, поскольку участок ND (рис. 1) характеристики используется полностью при работе на $(n-1)$ -й передаче. Однако точка B участка NB характеристики ТАД при работе на n -й передаче может оказаться не левее точки $C_3^{(1)}$, а значительно правее. Например, точка B совпадет с точкой C_2' . Тогда вместо кривой 3 может быть использована кривая 2; в этом случае длина участка характеристики ND при работе на $(n-1)$ -й передаче уменьшится, но не так существенно, как при работе по кривой 1.

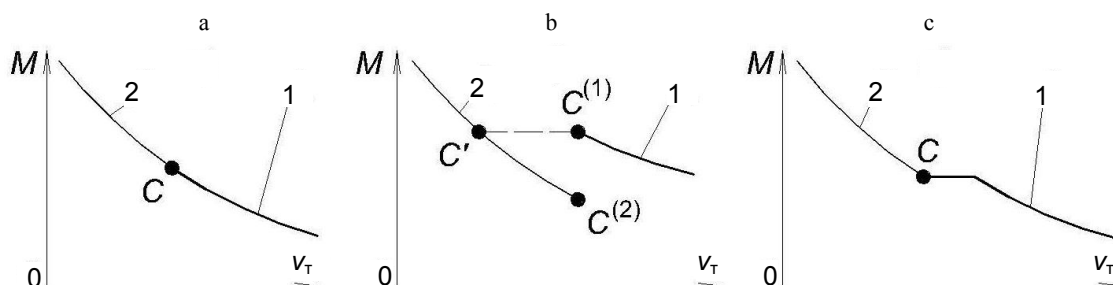


Рис. 2. Возможный вид соединения кривых зависимости момента на колесах от теоретической скорости для двух передач (а–с): 1 – кривая при работе на n -й передаче; 2 – кривая при работе на $(n-1)$ -й передаче; C – точка переключения передач

Fig. 2. Possible connecting type of curves pertaining to dependence of wheel torque on theoretical speed for two gears (a–c): 1 – curve while operating with n -gear; 2 – curve while operating with $(n-1)^{st}$ gear; C – point of gear-changing

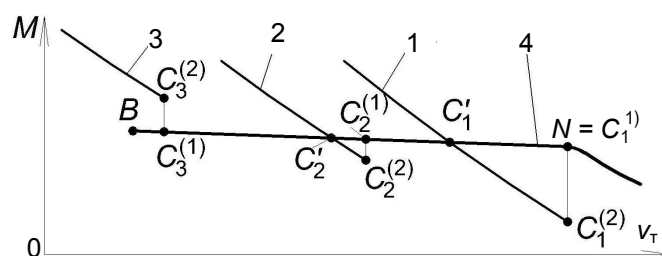


Рис. 3. Возможные случаи переключения передач

Fig. 3. Possible cases of gear change

Оценить, достаточно ли большой момент разовьет ТАД на $(n - 1)$ -й передаче при передаточном отношении, соответствующем кривой 3, или необходимо брать меньшее передаточное отношение, можно при помощи характеристики, показывающей максимально возможный момент на колесах исходя из ограничения по мощности ДВС (момент $M_{kДВС}$) и по сцеплению колес с опорной поверхностью ($M_{кф}$). Момент $M_{кф}$ на колесах определим согласно [11, с. 132]. Для приближенного определения $M_{kДВС}$ из зависимостей [10, с. 106, (3.42); с. 105, (3.34); с. 24, (1.17)] при максимально возможной мощности ДВС $P_{ДВС}$ и без отбора мощности получим формулу

$$M_{kДВС} = \frac{P_{ДВС} \eta_{тр}}{\omega_k} = \frac{P_{ДВС} r_{ст} \eta_{тр}}{v_t}, \quad (2)$$

где $r_{ст}$ – статический радиус колеса; ω_k – угловая скорость вращения колеса; $\eta_{тр}$ – КПД трансмиссии.

Более точно значение $M_{kДВС}$ можно вычислить по [9].

Для определения точки C можно использовать ЭВМ. Блок-схема приведена на рис. 4, где $f_{д, \max}$ – верхняя граница диапазона частот ТАД при работе на $(n - 1)$ -й передаче; $f_{д, \min}$ – нижняя граница при работе на n -й передаче; M_{B1} – мо-

мент на колесах при включенной n -й передаче и частоте $f_{д, \min}$; M_{B2} – то же при включенной $(n - 1)$ -й передаче и частоте $f_{д, \max}$. В блоке 1 расчет v_t производится по формуле [9, (7)], расчет $i_{тр, B1}$ в блоке 2 – по (1), где вместо $v_{t, \max}$ берется значение v_t , полученное в блоке 1; M_{B1} и M_{B2} – по методике [8]; hf – шаг изменения частоты.

Точка переключения находится для работы на номинальном режиме, затем выполняется проверка на предельном режиме работы, после чего передаточное отношение низшей передачи при необходимости корректируется.

После определения передаточного отношения передачи следует проверить, нужна ли $(n - 2)$ -я передача. Для этого можно построить характеристику $M(v_t)$ для трактора при работе на $(n - 1)$ -й передаче, используя все участки характеристики ТАД (в том числе и участок BA). Если две передачи обеспечивают требуемый момент на колесах для всех операций при номинальном режиме работы ТАД, а момент при работе на предельной характеристике не падает с понижением частоты f_1 , то двух передач достаточно. Если необходима $(n - 2)$ -я передача, то аналогично ищется точка переключения передач с $(n - 1)$ -й на $(n - 2)$ -ю и т. д.

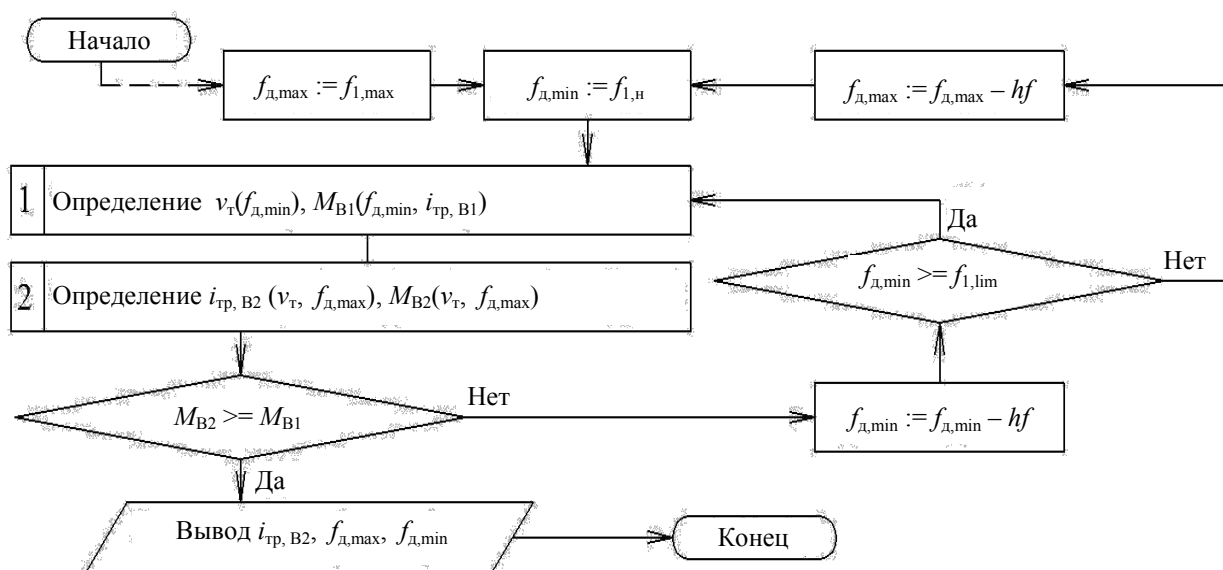


Рис. 4. Блок-схема алгоритма нахождения точки переключения передач

Fig. 4. Flowgraph for determine point of gear change

Определение передаточных чисел на примере трактора 5-го класса

По данной методике найдем число передач трактора 5-го класса для коэффициента сцепления $\varphi_{\text{сц}} = 0,6$. Зависимость, показывающую максимально возможный момент на колесах исходя из ограничения по мощности ДВС и по сцеплению колес с опорной поверхностью (для каждой точки построения берется минимальное значение из двух: $M_{\text{кф}}$ и $M_{\text{кДВС}}$), приведем на рис. 5. Это – предельно возможная характеристика для трактора с заданным сцепным весом, заданным коэффициентом сцепления и установленным ДВС. Момент, выше данного при таком ДВС, сцепном весе и коэффициенте сцепления, развить не удастся независимо от мощности ТАД, количества передач в коробке и передаточных отношений передач в коробке.

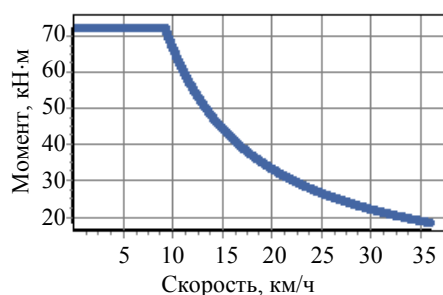


Рис. 5. Максимально возможный момент на колесах по мощности ДВС и сцеплению

Fig. 5. Maximum possible driving-wheel torque limited by the power of the internal combustion engine and by adhesion factor

Если теоретическая скорость 8 км/ч достаточна для пахоты, то можно ограничиться двумя передачами (табл. 1, рис. 6). Кривая 2 на рис. 6 соответствует максимальному моменту, который может обеспечить тяговый электродвигатель с учетом ограничения по сцеплению с опорной поверхностью и по мощности ДВС, т. е. при построении характеристики берется меньшее значение из трех моментов: момента ТАД при критическом скольжении, $M_{\text{кф}}$ и $M_{\text{кДВС}}$. При подобранных передаточных отношениях коробки (табл. 1) по расчетам согласно [8, 9] скольжение ТАД на участке характеристики справа от точки F и слева от E превысит номинальное и не достигнет критического, т. е. режим работы ТАД находится между номинальным и предельным. На участке EF

скольжение ТАД будет ниже номинального. Кривой 1 справа от точки F и слева от E соответствует номинальный режим работы ТАД. На участке EF кривая 1 ограничена кривой 2: ограничение по сцеплению не позволит выйти электродвигателю даже на номинальный режим работы; в точках E и F скольжение номинальное, а между ними оно ниже номинального; C – точка переключения передач. Слева от E и справа от F между кривыми 1 и 2 ТАД работает со скольжением, выше номинального и ниже критического, т. е. превышен номинальный режим работы. Ниже кривой 1 скольжение ТАД меньше номинального, т. е. номинальный режим работы не достигнут.

Таблица 1

Результаты расчета при использовании двухскоростной коробки передач

Calculation results while using two-speed transmission

Показатель	Диапазон передач	
	1	2
Диапазон частот питания ТАД, Гц	63–180	До 180
Передаточное отношение	35,57	103,00
Диапазон скоростей $v_{\text{т}}$, км/ч	15–45	До 15

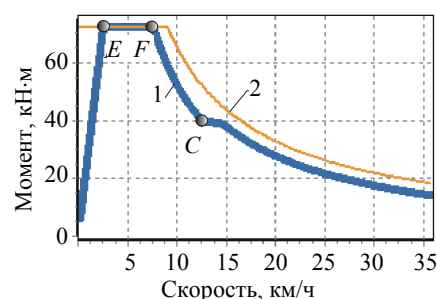


Рис. 6. Динамическая характеристика трактора с двухскоростной коробкой передач при коэффициенте сцепления $\varphi_{\text{сц}} = 0,6$

Fig. 6. Dynamic characteristic of tractor equipped with two-speed gearbox with adhesion factor equals 0,6

Если сравнить график на рис. 5 и кривую 2 на рис. 6, то видно, что ТАД при подобранных передаточных отношениях может обеспечить максимально возможный момент на колесах трактора, который определяется сцеплением колес с опорной поверхностью и максимальной мощностью ДВС. По кривой 1 на рис. 6 видно, что: 1) ТАД при номинальном режиме работы обеспечивает рабочие режимы трактора, требующие максимально возможный момент по сцеплению (точка E – бульдозерные работы;

F – пахота), а на отрезке EF при расчетном коэффициенте сцепления ТАД не сможет развить даже номинальный режим; 2) при работе на транспортном режиме условие устойчивого движения соблюдается. Чтобы проверить, можно ли на участке EF работать на пахоте с увеличенным сцепным весом, сохраняя при этом номинальное скольжение ТАД, на рис. 7 построим те же кривые 1 и 2 при массе трактора, увеличенной с эксплуатационной до максимальной. Отрезок EF уменьшится до $E'F'$. В точках E' и F' скольжение будет номинальным, а между ними – ниже номинального. В соответствии с кривой 1 при увеличенном сцепном весе трактора можно работать на пахоте, сохраняя номинальный режим, несколько снизив скорость (точка F'). Как видно по кривой 2, момент по сцеплению обеспечивается на всем скоростном диапазоне до точки E' , т. е. трактор сможет разогнаться при превышении номинального режима работы ТАД. Таким образом, по обеим кривым рис. 7 видно, что подобранные передаточные отношения позволяют работать трактору на пахоте при увеличенном сцепном весе.

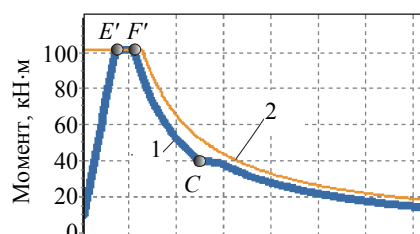


Рис. 7. Динамическая характеристика трактора с двухскоростной коробкой передач при коэффициенте сцепления $\phi_{\text{сц}} = 0,6$ и увеличенной массе трактора

Fig. 7. Dynamic characteristic of tractor equipped with two-speed gearbox with adhesion factor equals 0,6 and jumbo weight of tractor

ВЫВОДЫ

1. Предложена методика для выбора числа передач коробки и передаточных отношений механической части электромеханической трансмиссии трактора, содержащей тяговый асинхронный электродвигатель с частотным регулированием, которая применена на примере колесного трактора 5-го класса.

2. Для колесного трактора 5-го класса с максимальной скоростью движения 36 км/ч при

коэффициенте сцепления колес с опорной поверхностью 0,6 достаточно применить две передачи в коробке: для работы на всех операциях трактора номинальное скольжение не будет превышено; на предельном режиме работы электродвигателя во всем диапазоне скоростей трактора обеспечится максимально возможный момент на колесах, определяемый по максимальной мощности двигателя внутреннего сгорания и по сцеплению колес с опорной поверхностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тракторы. Дипломное проектирование / Я. Е. Атаманов [и др.] / под общ. ред. В. В. Будько. Минск: Вышэйш. шк., 1985. 160 с.
2. Холодов, А. М. Землеройно-транспортные машины / А. М. Холодов, В. В. Ничке, Л. В. Назаров. Харьков: Вища шк., 1982. 192 с.
3. Создание на РУП «Минский тракторный завод» многокорпусных плугов для высокопроизводительной обработки почвы [Электронный ресурс] // Министерство промышленности Республики Беларусь. Режим доступа: <http://www.minprom.gov.by/innovacia?ID=25>. Дата доступа: 04.02.2013.
4. Трактор 3023 // Официальный интернет-портал ПО «Минский тракторный завод» [Электронный ресурс]. 1998–2013. Режим доступа: <http://www.belarus-tractor.com/ru/main.aspx?guid=45893&mode=fullinfo>. Дата доступа: 08.04.2013.
5. Жданович, Ч. И. Выбор способа регулирования тягового асинхронного электродвигателя трактора и построение механической характеристики / Ч. И. Жданович, Н. В. Калинин // Наука и техника. 2013. № 3. С. 60–67.
6. Белоусов, Б. Н. Колесные транспортные средства особо большой грузоподъемности. Конструкция. Теория. Расчет / Б. Н. Белоусов, С. Д. Попов; под общ. ред. Б. Н. Белоусова. М.: Изд-во МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2006. 728 с.
7. Кацман, М. М. Электрические машины / М. М. Кацман. М.: Высш. шк., 2000. 463 с.
8. Жданович, Ч. И. Зависимость характеристик трактора с механической трансмиссией от температуры обмоток тягового электродвигателя / Ч. И. Жданович, Н. В. Калинин // Проблемы проектирования и развития тракторов, мобильных машин, городского электротранспорта: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 60-летию кафедры «Тракторы» БНТУ, Минск, 23–24 нояб. 2013 г. / БНТУ; редкол.: В. П. Бойков, Ч. И. Жданович. Минск, 2013. С. 60–67.
9. Жданович, Ч. И. Определение максимального момента на колесах трактора с электромеханической трансмиссией / Ч. И. Жданович, Н. В. Калинин // Проблемы проектирования и развития тракторов, мобильных машин, городского электротранспорта: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 60-летию кафедры

«Тракторы» БНТУ, Минск, 23–24 нояб. 2013 г. / БНТУ; редкол.: В. П. Бойков, Ч. И. Жданович. Минск, 2013. С. 54–59.

10. Тарасик, В. П. Теория движения автомобиля / В. П. Тарасик. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 478 с.
11. Тракторы. Ч. 3. Конструирование и расчет / В. В. Гуськов [и др.]; под общ. ред. В. В. Гуськова. Минск: Вышэйш. шк., 1981. 383 с.

Поступила 24.07.2015

Подписана в печать 25.09.2015

Опубликована онлайн 22.01.2016

REFERENCES

1. Atamanov Iu. E., Budko V. V., Boikov V. P., Vasilev V. T., Kabanov V. I., Lefarov A. Kh., Masiuk S. K. (1985) *Tractors. Diploma Project Engineering*. Minsk, Vesheyskaya Shkola. 160 p. (in Russian).
2. Kholodov A. M., Nichke V. V., Nazarov L. V. (1982) *Earth-Moving and Transport Machinery*. Kharkov, Vysshaya Shkola. 192 p. (in Russian).
3. Development of Multi-Bottom Ploughs for Highly-Productive Soil Treatment at RUE "Minsk Tractor Works". *Ministry of Industry of the Republic of Belarus*. Available at: <http://www.minprom.gov.by/innovacia?ID=25>. (Accessed 4 February 2013) (in Russian).
4. Tractor 3023. *Official Web-Portal of RUE "Minsk Tractor Works"*. Available at: <http://www.belarus-tractor.com/ru/main.aspx?guid=45893&mode=fullinfo>. (Accessed 4 April 2013) (in Russian).
5. Zhdanovich Ch. I., Kalinin N. V. (2013) Selection of Method for Regulation of Traction Asynchronous Electric Motor of Tractor and Development of Mechanical Characteristics. *Nauka i Tekhnika* [Science and Technique], (3), 60–67 (in Russian).
6. Belousov B. N., Popov S. D. (2006) *Specifically Heavy-Duty Wheeled Vehicles. Design. Theory. Calculation*. Moscow: Publishing House of Moscow State Technical University Named after N. E. Bauman. 728 p. (in Russian).
7. Katsman M. M. (2000) *Electrical Machinery*. Moscow, Vysshaya Shkola. 463 p. (in Russian).
8. Zhdanovich Ch. I., Kalinin N. V. (2013) Dependence of Characteristics of Tractor with Mechanical Transmission on Temperature of Traction Electric Motor Windings. *Problems in Designing and Development of Tractors, Mobile Machinery, Urban Electric Transport. Proceedings of International Scientific and Technical Conference Devoted to the 60th Anniversary of "Tractors" Department, BNTU, Minsk, November 23–24, 2013*. Minsk, BNTU, 60–67 (in Russian).
9. Zhdanovich Ch. I., Kalinin N. V. (2013) Determination of Maximum Moment on Wheels of Tractor with Electro-Mechanical Transmission. *Problems in Designing and Development of Tractors, Mobile Machinery, Urban Electric Transport: Proceedings of International Scientific and Technical Conference Devoted to the 60th Anniversary of "Tractors" Department, BNTU, Minsk, November 23–24, 2013*. Minsk, BNTU, 54–59 (in Russian).
10. Tarasik V. P. (2006) *Theory of Automobile Movement*. Saint-Petersburg, BKhV-Petersburg. 478 p. (in Russian).
11. Guskov V. V., Ksenevich I. P., Atamanov Iu. E., Solon-skii A. S. (1981) *Tractors. Part 3. Designing and Calculation*. Minsk, Vesheyskaya Shkola. 383 p. (in Russian).

Received: 24.07.2015

Accepted: 25.09.2015

Published online: 22.01.2016

УДК 621.26:629.243:629.244

Повышение эксплуатационных показателей автобуса путем интегрированного управления подвеской и трансмиссией

Канд. техн. наук, доц. В. В. Михайлов¹⁾, инж. А. Г. Снитков¹⁾, канд. техн. наук С. В. Ляхов¹⁾¹⁾ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси» (Минск, Республика Беларусь)© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Выполнены полунатурные испытания активной пневматической подвески туристического автобуса массой 18 т с системой автоматической стабилизации кузова мобильной машины и обратной связью по кинематическому параметру при его комплектации автоматической гидромеханической передачей при разгоне, переключениях или торможении на дороге, заданной случайными неровностями. Проведено компьютерное моделирование динамических структур в комбинации с виртуальными приборами и реальными объектами (HIL – Hardware-in-the-Loop Simulation). В процессе исследования использовали персональные компьютеры, программное обеспечение, программируемый логический контроллер, генератор частоты, электромагнитный клапан. Предлагается оригинальный способ повышения эксплуатационных свойств, основанный на интегрированном управлении подвеской и автоматической гидромеханической трансмиссией. Математическая модель включает системы автоматической трансмиссии, подвески и модуль генерации случайных дорожных неровностей. Эта модель была положена в основу полунатурного лабораторного стенда с промышленно выпускаемым контроллером, другими компонентами автоматических систем и штатных органов управления. Наиболее эффективным способом стабилизации кузова считается управление подвеской по параметру угловой скорости вертикального поворота продольной оси автомобиля с точкой поворота в центре масс. Разработанные алгоритм и система стабилизации по угловой скорости поворота продольной оси кузова позволили улучшить динамику автобуса при переключениях передач и снизить расход топлива при трогании и разгоне. Одновременно при торможении такая система уменьшает амплитуду колебаний отдельных параметров более чем в два раза.

Ключевые слова: модель, пневматическая подвеска, трансмиссия, управление, неровности, HIL-стенд

Для цитирования: Михайлов, В. В. Повышение эксплуатационных показателей автобуса путем интегрированного управления подвеской и трансмиссией / В. В. Михайлов, А. Г. Снитков, С. В. Ляхов // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 1. С. 37–45

Improvement of Bus Operational Characteristics While Using Integrated Control of Suspension and Transmission

V. V. Mikhailau¹⁾, A. G. Snitkov¹⁾, S. V. Liahov¹⁾¹⁾State Scientific Institution “Joint Institute of Mechanical Engineering of National Academy of Sciences of Belarus” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Semi-natural tests for active pneumatic suspension of a 18-tonne tourist bus with the system of automatic body stabilization of the mobile machine and feed-back coupling according to kinematics parameter. The test have been executed in the cases when the bus is stocked with an automatic hydro-mechanical transmission in the process of speed picking up, gear-changing or road braking which is assigned by accidental road humps. A computer simulation of dynamic structures in combination with virtual devices and real objects (HIL – Hardware-in-the-Loop Simulation) has been carried in the paper.

Адрес для переписки

Михайлов Валерий Валерианович
ГНУ «Объединенный институт машиностроения
НАН Беларуси»
ул. Академическая, 12,
220072, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 284-25-93
valery.mikhailov@gmail.com

Address for correspondence

Mikhailau Valeriy V.
State Scientific Institution “Joint Institute of Mechanical
Engineering of National Academy of Sciences of Belarus”
12 Akademicheskaya str.,
220072, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 284-25-93
valery.mikhailov@gmail.com

Personal computers, software, programmed logic controller, frequency generator, solenoid-operated valve have been used for the investigation process. The paper proposes an unconventional method for improvement operational characteristics which is based on integrated control of a suspension and automatic hydro-mechanical transmission. A mathematical model includes systems of automatic transmission, suspension and module for generation of accidental road humps. The model has been considered as a basis for semi-natural laboratory bench with industrially-manufactured controller, other components of automatic systems and standard control organs. The most efficient method for body stabilization is control of the suspension according to the parameter of angular rate during vertical turn of an automobile's center line with a turning point in the center of mass. The developed algorithm and stabilization system according to angular rate of body's center line turning have made it possible to improve dynamics of the bus while making gear-changing and to reduce fuel consumption during starting-up and speed picking-up processes. During the braking process such system simultaneously decreases oscillation amplitude of some parameters more than two-fold.

Keywords: model, pneumatic suspension, transmission, control, road humps, HIL-simulation

For citation: Mikhailau V. V., Snitkov A. G., Liahov S. V. (2016) Improvement of Bus Operational Characteristics While Using Integrated Control of Suspension and Transmission. *Science & Technique*. 15 (1), 37–45 (in Russian)

Введение

Условием эффективной работы мобильных машин является слаженное взаимодействие основных систем шасси, в том числе трансмиссии, подвески, тормозной системы, рулевого управления и др. В помощь водителю создаются так называемые «ассистенты», автоматизирующие процесс управления в тех или иных ситуациях. Отдельные системы шасси мобильных машин и их модели достаточно представлены в современной научной и технической литературе, например для исследования угловых колебаний кузовов автотранспортных средств [1], активных подвесок с управляющими контурами [2], колебаний мобильных машин при повороте управляемых колес [3] с учетом работы автоматизированных трансмиссий [4].

Комплексное создание ассистентов водителя типа ESP (Electronic Stability Program) отражает суть дальнейшего последовательного объединения разнотипных систем и устройств в единый управляемый блок. Сегодня на автомобиле одновременно может взаимодействовать несколько автономных управляемых колебательных систем с наложенными на них случайными воздействиями от неровностей опорной поверхности, например, как показано в [5].

Чаще всего автоматические системы управления работают с гидравлической или пневматической рабочей средой, обладают сравнительно высоким быстродействием для регулирования давления фрикционов, элемента подвески, других исполнительных устройств. В этой связи весьма важным является проведение экспериментов и исследований в реальном (Real Time) режиме времени [6], что определяет серьезные требования к виртуальной части исследовательского

комплекса и высокому качеству применяемых моделей.

Очевидно, что улучшение отдельных эксплуатационных свойств не должно отрицательно влиять на другие. Например, автоматизация трансмиссии не должна отрицательно сказываться на плавности хода или ухудшать топливную экономичность. Поэтому разработку и корректировку систем шасси следует проводить комплексно, с учетом различных состояний, для чего авторы достаточно время создают алгоритмы управления, модели и стенды, при помощи которых надежно и безопасно производят весь экспериментальный подготовительный цикл.

В настоящей работе показана технология исследования и отладки контура управления активной подвеской заднего моста туристического автобуса при его прямолинейном движении с учетом переходных процессов в автоматической трансмиссии, угловых и вертикальных колебаний кузова при движении по случайным неровностям опорной поверхности, приведены результаты исследований.

Основная часть

При угловой продольной стабилизации колебаний кузова автомобиля особенно важными считаются три основных компонента колебательной системы: кузов транспортного средства, системы подвески и колес (неподдрессированные массы). Кинематика и динамика подвески могут быть описаны при взаимодействии между собой указанных твердых тел и безынерционных упругих элементов. Включение в систему взаимодействия случайных неровностей дороги и шин также является неотъемлемой

частью процесса исследований динамики автомобиля, например, как уже это сделали авторы [7]. Окончательный выбор математической модели зависит от возможностей корректного получения и использования нелинейных характеристик элементов, совмещения модели подвески с элементами трансмиссии и случайными неровностями опорной поверхности в реальном режиме времени.

Несмотря на то что в настоящее время наибольшее распространение получают все же пассивные системы амортизации, применение таких систем во всем диапазоне колебательных явлений неоднозначно сказывается на качестве движения и неизбежно ведет к ухудшению показателей плавности. Поэтому ставится задача создания активных систем демпфирования продольно-угловых колебаний и в первую очередь в низкочастотной области. Для длинноразмерной конструкции, каковой является кузов туристического автобуса, гашение колебаний и подавление амплитуд динамических воздействий могут быть определены как первоочередные меры [1]. Вследствие этого введение контура активного управления подвеской ведущего заднего моста и ее элементами имеет практический интерес.

Поскольку наилучшим образом может быть реализована одноконтурная система активного управления упругодемпфирующими элементами подвески, было предложено апробировать, наряду с элементами пассивной двухбаллонной подвески переднего моста туристического автобуса массой 18 т, активный ее блок в виде четырех аналогичных баллонов заднего моста для стабилизации углового перемещения подвешенной массы.

В [8] определена роль подвески не только для выполнения основной функции изоляции пассажиров и шасси от воздействий неровностей дороги, но и контроля качества движения. В этой связи к новым технологиям управления, включающим электронные блоки, проявляется большой интерес. Эти системы имеют активные компоненты, управляемые микропроцессором. С помощью такой конструкции может быть произведена существенная модернизация транспортного средства. При этом выбранный способ управления также занимает важное место в процессе разработки.

Двухколесная математическая модель подвески автобуса с обратной связью по угловому отклонению кузова в интегрированном стенде для исследования системы в реальном времени

В связи со значительной массой автобуса (18 т) выбран зависимый тип подвески. Зависимая подвеска обеспечивает большой срок службы всех шарниров в связи с меньшими нагрузками в них, имеет лучшую ремонтопригодность.

С учетом [7] авторами для исследовательского HIL-стенда (HIL – Hardware-in-the-Loop Simulation) в среде разработки LabVIEW разработан виртуальный прибор управляемой подвески с регулируемыми значениями жесткости, в том числе с имитацией пневматических баллонов заднего моста (рис. 1).

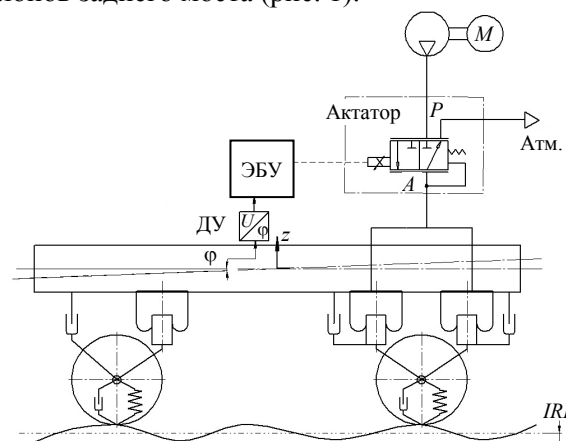


Рис. 1. Блок-схема виртуального прибора подвески автобуса с регулируемыми пневматическими баллонами заднего моста

Fig. 1. Block-diagram of virtual device for bus suspension with regulated pneumatic cylinders of rear axle

Регистрация колебаний (отклонений угла φ и изменения ординаты z) кузова автобуса осуществляется при воздействии на систему виртуальных приборов, имитирующих случайные неровности согласно [7], а также упругого момента на колесах трансмиссии [4]. Параметры этих неровностей регулируются в реальном времени исходя из настройки средней величины IRI (International Roughness Index), равно как и параметры работы автоматической трансмиссии согласно [6].

Решение задачи управления угловым положением кузова проведено по информации от

двух ультразвуковых датчиков перемещений (ОАО «Измеритель», г. Новополоцк, Республика Беларусь), пересчитываемых в продольный угол поворота кузова $\Delta\varphi$.

Задача стабилизации решается посредством введения активной обратной связи по угловому отклонению в контроллер с последующим пропорциональным управлением потока воздуха, нагнетаемого в пневмобаллоны подвески заднего моста автобуса.

Такой виртуальный прибор подвески для плоской двухколесной модели [7] автобуса, работающий в реальном времени с регулированием параметров подвески для ее динамических испытаний, представлен на рис. 2.

**НП-стенд, реализующий систему активной стабилизации
углового положения кузова автобуса
с виртуальными приборами
автоматической трансмиссии
и случайных неровностей**

Сборка испытательного НП-стенда произведена на основе промышленного программируемого контроллера высокой производительности, выпускаемого ОАО «Измеритель» для САУ ГМП отечественных мобильных машин, позволяющего управлять восьмью актюаторами

одновременно, а также обрабатывать значительные массивы значений. Это обеспечивает высокое быстродействие регулирования элементов подвески и высокий уровень комфорта пассажиров. Общий вид стенда представлен на рис. 3.

Контроллер (ЭБУ – электронный блок управления) имеет следующие параметры:

- микропроцессор: тактовая частота 72 МГц, количество разрядов 16, оперативная память (RAM) 64 кбайт;
- входные сигналы: аналоговые – 10, дискретные – 11, частотные – 4 (диапазон измерения частоты 0–10 кГц), резистивные для измерения температуры – 2;
- выходные сигналы: ШИМ для управления электромагнитами УРК – не менее 9 шт. (все каналы ШИМ должны быть оснащены обратными связями по току, диапазон регулирования тока 0–2,3 А, рабочий диапазон частоты до 1,0 кГц, частота осцилляции до 100 Гц); дискретные выходы: на ток 3,0 А – 6 шт., на ток 0,2 А – 2 шт.;
- интерфейс CAN 2.0 В по ISO 11898 – 2 шт.;
- питание ЭБУ – бортовая сеть. Номинальное напряжение питания 24 В по ГОСТ 3940–2004, диапазон допускаемого изменения напряжения 18–32 В.

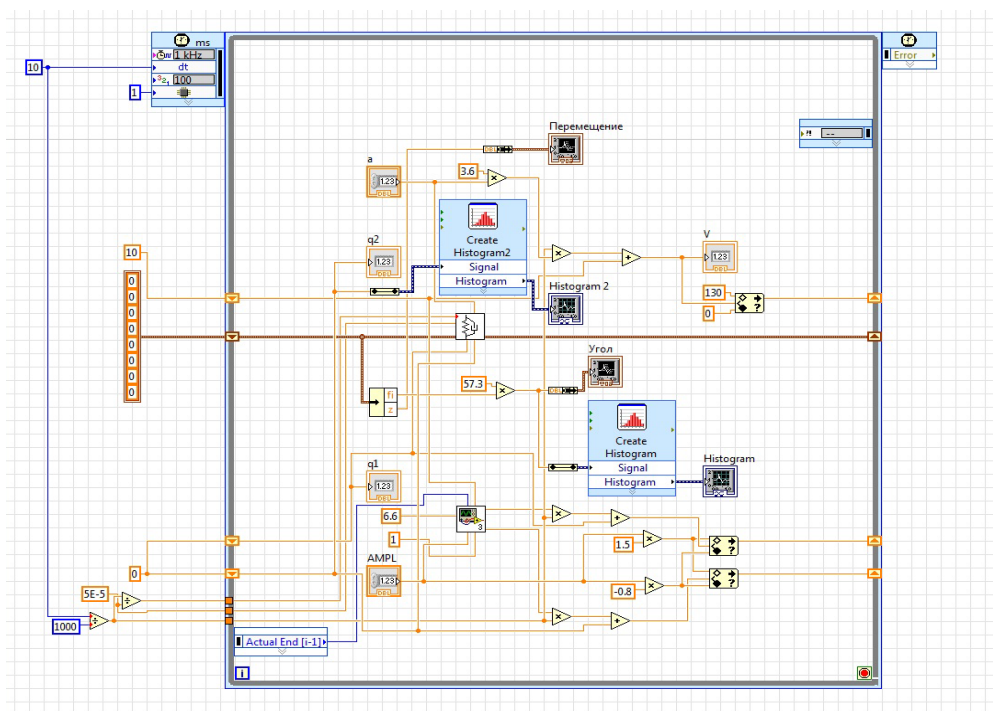


Рис. 2. Реализованная блок-схема виртуального прибора подвески автобуса

Fig. 2. Realized block-diagram of virtual device for bus suspension

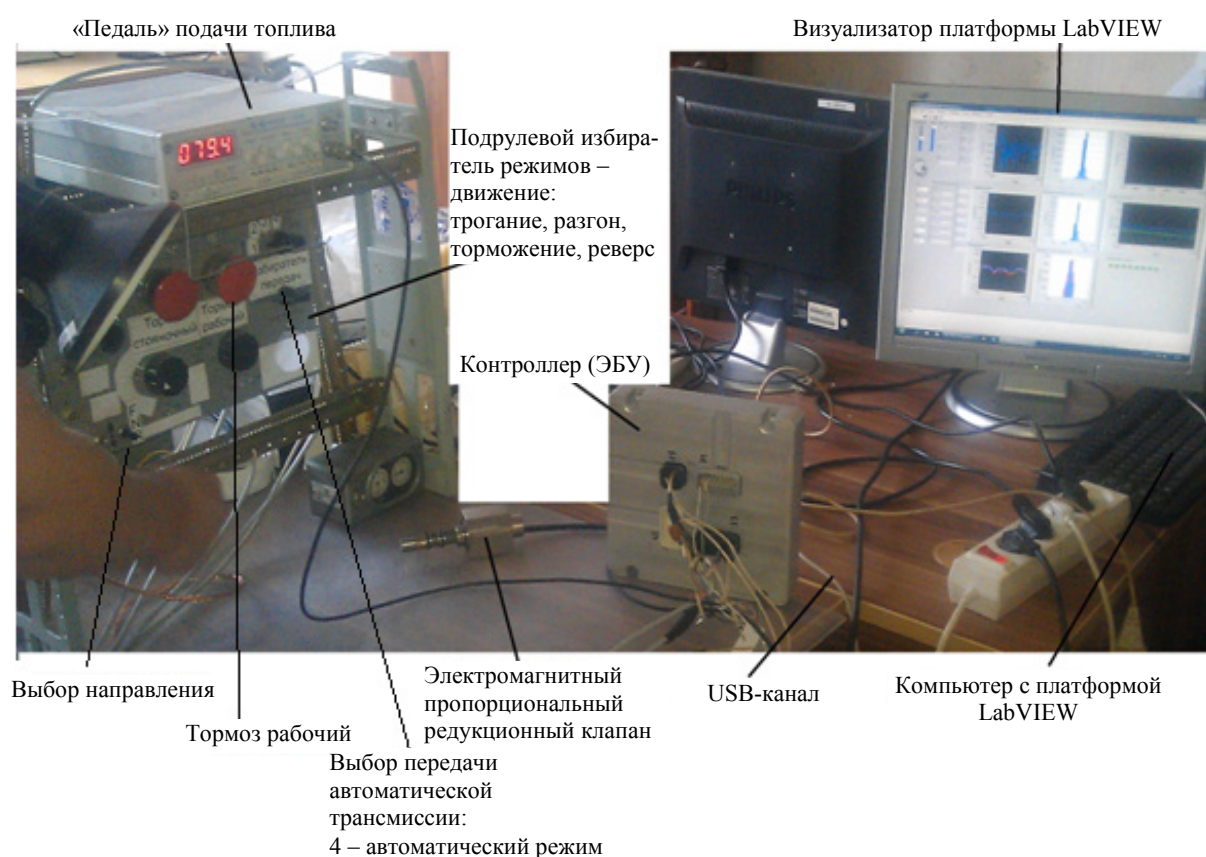


Рис. 3. Общий вид HIL-стенда с использованием средств цифровой регистрации и измерения электрических параметров для исследования и отработки взаимодействия алгоритмов управления и штатных аппаратных средств для системы стабилизации кузова автобуса с автоматической гидромеханической трансмиссией

Fig. 3. General view of HIL-test-bench while using digital registration and measuring electrical parameters for investigation and optimization on interaction of control algorithms and operational apparatus facilities for stabilization system of bus body with automatic hydro-mechanical transmission

Режим работы ЭБУ – продолжительный номинальный S1 по ГОСТ 3940–2004.

Согласно представленной на рис. 4 схеме стенда, имитация движения автобуса начинается выбором положения избирателем режимов 1 (селектором), сигналы от которого через контроллер (ЭБУ) 11 поступают в кластер 2. Регулирование двигателя осуществляется потенциометром – аналогом «педали» подачи топлива 3, имитируемого физическим сигналом генератора частоты и подаваемого на соответствующие клеммы 11. ЭБУ 11 через USB-канал 4 сопряжен с кластером 2. В свою очередь кластер 2 включает модели алгоритма 5 работы автоматической трансмиссии автобуса, представленной моделью 6. Другой компьютер кластера 2 содержит модель подвески 7 с генератором 8 случайных неровностей.

В схеме имеется система стабилизации положения кузова автобуса по параметру (углу,

перемещению центра масс) или его скорости, которая включает контроллер с алгоритмом 9 и исполнительное устройство в виде электромагнитного клапана. Алгоритм 9 стабилизации реализован в виде конечного автомата с пороговым регулированием давления по непрерывно изменяемому току управления, подаваемому на клеммы платы сбора данных (контроллер), и имитацией включения кнопок «Включено» или «Выключено».

Все созданные компоненты подготовлены и протестированы соответствующим образом, как показано на рис. 3, для схемы на рис. 4.

Компоненты системы взаимодействуют через контроллер (ЭБУ) и USB-порт между контроллером и соответствующим главным HOST-компьютером. Как показано на рис. 3, HOST-компьютер реализует все модели, алгоритмы управления, дисплей, пульт управления (частично) и обработчик данных LabVIEW.

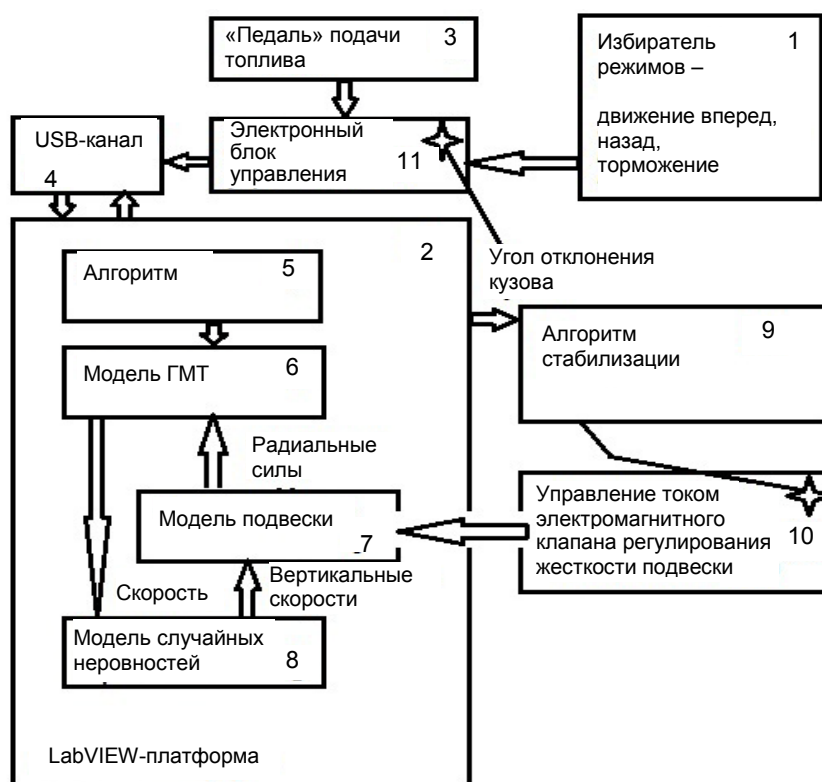


Рис. 4. Схема взаимодействия блоков испытательного HIL-стенда

Fig. 4. Scheme of block interaction for HIL-test-bench

Установка вариантов алгоритма в контроллер может производиться периодически после отдельной корректировки и доводки в процессе эксплуатационных испытаний объекта, во время которых контроллер является источником информации, передаваемой для записи и обработки на мобильный сервер. Это позволяет избежать смещения аппаратных и алгоритмических ошибок и значительно ускорить процесс производства системы.

Испытательный HIL-стенд работает следующим образом. На дисплее HOST-компьютера запускается модель трансмиссии и подвески с инициализацией всех устройств. Выбирают режим движения дискретным включением тумблеров направления движения «Вперед» или «Назад», изменяют положение «педали» и условной «дроссельной заслонки», выбирая скорость движения автобуса. В последующем, используя виртуальные ползунки регулирования параметров модели трансмиссии, сопротивления движению, подвески и неровностей, определяют соответствующий режим исследования процессов. При включении тумблера «Включение» осуществляется стабилизация кузова по соответствующему алгоритму управ-

ления. При нахождении тумблера в положении «Выключено» система стабилизации не функционирует. Управление системой, выбор включения и выключения системы стабилизации, корректировка движения осуществляются алгоритмом автономно и автоматически без участия оператора с реализацией кинематических и силовых движений на экране HOST-компьютера.

Тестирование HIL-комплекса производили для параметров автобуса, которые представлены в табл. 1. Расчеты проводили для случая разгона туристического автобуса до скорости 130 км/ч с ускорением 1 м/с². Согласно нормативным документам предельные технические нормы плавности хода автобусов должны соответствовать среднеквадратическим значениям линейных ускорений до 1,3 м/с².

На основании [9–12], отечественного и зарубежного опыта угол бокового наклона кузова должен выбираться не более 7° для легковых автомобилей и до 6° – для грузовых и автобусов. Параметры вертикальных колебаний кузова могут лишь рекомендоваться к применению. При большем количестве систем шасси можно использовать опыт исследований [10–12].

Таблица 1

Параметры туристического автобуса,
для которых проводился эксперимент
Parameters of tourist bus under experimental conditions

Параметр	Значение
Габаритные размеры автобуса, мм	12000/2550/3820
База, мм	6060
Колея колес (передних/задних), мм	2093/1825
Количество мест для сидения, шт.	45
Максимальная скорость, км/ч	134
Двигатель	MAN D 2866 LOH 28(E-3)
Мощность двигателя, кВт (л. с.)	265 (360)
Колеса	8.25×22.5
Размер шин	Бескамерные 295/80R22.5
Полная масса, кг	18000
Поддрессоренная масса автобуса, кг	16200
Неподдрессоренная масса переднего моста, кг	625
Неподдрессоренная масса заднего моста, кг	1200
Высота центра тяжести, м	1,25
Положение центра масс, м	3,703/2,357
Жесткость шин переднего моста, Н/м	1100000

Окончание табл. 1

Параметр	Значение
Жесткость шин заднего моста, Н/м	2200000
Средний коэффициент демпфирования элементов, Н·с/м:	
переднего моста	14045
заднего моста	20000
Ход сжатия, м	0,1
Ход отбоя, м	0,1
Размеры пневмобаллона, диаметр/высота, мм	450/300
Диапазон средних высот случайных неровностей IRI, мм/м	3,7–8,0

Обсуждение

Пример расчета представлен на рис. 5. Последующий анализ полученных результатов показал работоспособность стенда, созданного сочетанием моделей и физических устройств, органов и системы управления на единой управляемой платформе, работающей в реальном времени. Последнее является наиболее важным моментом для коррекции алгоритмов управления, диагностирования и безопасной адаптации подобных управляющих систем.

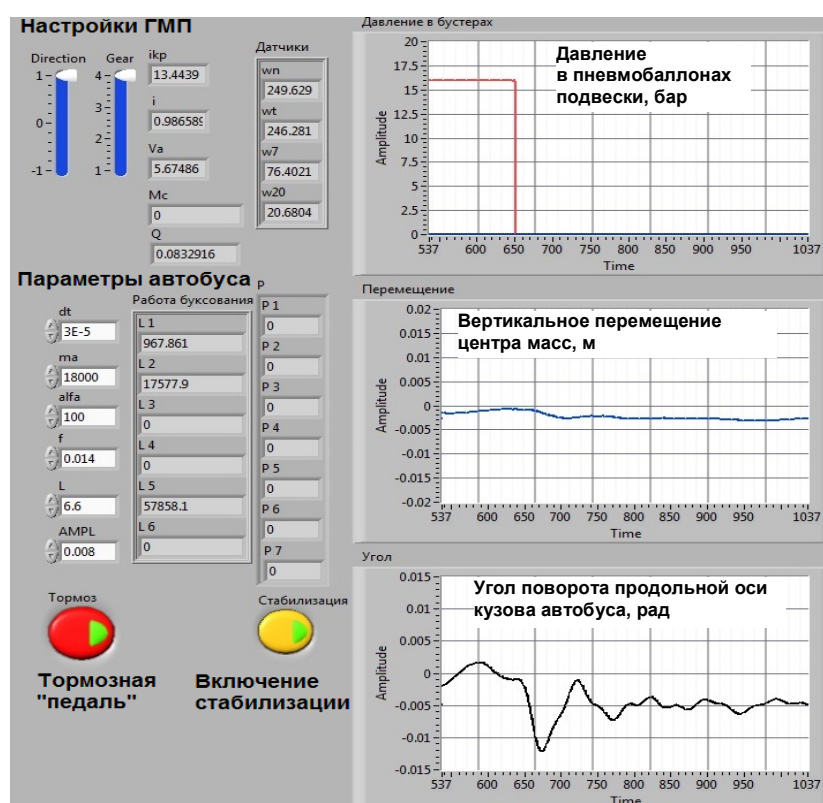


Рис. 5. Вид основной панели HOST-компьютера с визуализацией полученных данных испытаний при торможении автобуса со скоростью 20 км/ч до окончания угловых колебаний кузова автобуса на дороге с параметром $IRI = 0,008$ мм/м.

Торможение со стабилизацией по вертикальной скорости

Fig. 5. View of main HOST-computer panel with visualization of the obtained test data while putting a brake on a bus with the speed of 20 km/h up to completion of angular oscillations of bus body on the road with the parameter $IRI = 0,008$ mm/m.

Braking with stabilization according to vertical speed

Усредненные оценки влияния системы автоматической стабилизации положения кузова на величину расхода топлива и время разгона при трогании автобуса массой 18 т и разгоне в автоматическом режиме трансмиссии до фиксированной скорости 20 км/ч представлены в табл. 2.

Таблица 2

Вид стабилизации	Гидротрансформатор не заблокирован	
	Расход топлива при разгоне, л	Максимальное время разгона до 20 км/ч, с
$IRI = 0,00370$ мм/м		
Без стабилизации	0,08160	18,7
По скорости ω_y	0,07780	17,7
По скорости v_z	0,08140	19,5
$IRI = 0,00800$ мм/м		
Без стабилизации	0,08154	18,7
По скорости ω_y	0,08132	18,7
По скорости v_z	0,08157	18,8

Становится понятным, что для режимов трогания и разгона автобуса регулирование по параметру угла отклонения продольной оси предпочтительнее, чем по параметру перемещения центра масс автобуса. Кроме того, стабилизация по линейной скорости перемещения центра масс либо по угловой скорости поворота продольной оси более целесообразна для быстрого действия и качества стабилизации колебаний кузова туристического автобуса.

При анализе табл. 2 очевидно, что система стабилизации по угловой скорости поворота кузова автобуса может улучшать динамику переключений и снижать расход топлива. При этом разница заметно существеннее, если качество дорожного полотна более высокое.

При торможении автобуса система стабилизации также проявляет свои положительные качества. Испытания показали, что при торможении автобуса без системы стабилизации кузова длительность колебаний продольной оси до затухания составляет 0,50 с; с системой стабилизации по вертикальной скорости центра масс автобуса 0,25 с, с системой стабилизации по угловой скорости продольной оси автобуса 0,15 с. Данный факт весьма существен для мобильных строительных и дорожных машин, изготавливающих дорожные одежды и покрытия

(катки, грейдеры, погрузчики, планировщики).

ВЫВОДЫ

1. Разработан способ повышения эксплуатационных показателей автобуса путем интегрированного управления подвеской и трансмиссией, в основу которого положена комплексная математическая модель, включающая автоматическую трансмиссию, систему подвески, модуль генерации случайных дорожных неровностей, систему автоматической стабилизации кузова. Проведенные исследования показали адекватность способа и его пригодность для корректировки элементов систем шасси.

2. Разработан и испытан полунатурный лабораторный стенд, включающий контроллер, селектор автоматической коробки передач, штатные органы управления, физический имитатор приводного двигателя, пропорциональный клапан регулирования давления рабочей среды в пневматических баллонах задней оси. Физические компоненты стенда объединены единой интегрирующей с вышеназванной комплексной моделью шасси туристического автобуса с регулируемой жесткостью пневматических элементов подвески. Проведенные исследования показали работоспособность стенда, созданного на базе интегрирующей платформы сбора, управления и обработки данных. Последнее является наиболее значимым моментом для коррекции, диагностирования и безопасной адаптации подобных управляющих систем.

3. Установлено, что при трогании и разгоне колесной мобильной машины предпочтительной и эффективной является автоматическая стабилизация по угловой скорости поворота продольной оси автомобиля в вертикальной плоскости. Показано, что предложенный алгоритм и система стабилизации по угловой скорости поворота продольной оси кузова позволяют улучшать динамику автобуса при переключениях передач и снижать расход топлива. При торможении применение системы автоматической стабилизации кузова позволяет уменьшить время колебательного процесса более чем в два раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурьян, Ю. А. Управление угловыми колебаниями автотранспортных средств / Ю. А. Бурьян, В. Н. Сорокин // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 6. С. 36–40.
2. Active Suspension System of One-Wheel Car Models Using the Sliding Mode Control with VSS Observer // T. Yoshimura [et al.] // International Journal of Vehicle Autonomous System. 2002. Vol. 1, No 1. P. 133–152.
3. Нас, А. Improvements in Vehicle Handling // А. Нас, М. О. Bodie // International Journal of Vehicle Autonomous System. 2002. Vol. 1, No 1. P. 83–109.
4. Математическая модель автоматической трансмиссии в структуре испытательного комплекса / В. В. Михайлов [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. 2012. № 2 (19). С. 22–28.
5. Михайлов, В. В. Исследование процесса поворота мобильной машины на неровной дороге с помощью плоской комплексной модели / В. В. Михайлов // Механика машин, механизмов и материалов. 2013. № 3 (24). С. 20–27.
6. Михайлов, В. В. Комплексная система отладки и диагностирования алгоритмов систем автоматического управления гидромеханическими трансмиссиями / В. В. Михайлов, А. Г. Снитков // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. Минск: ОИМ НАН Беларуси. 2012. Вып. 1. С. 316–319.
7. Михайлов, В. В. Формирование колебательных воздействий и расчет нагрузок в контакте колес автомобиля с неровной поверхностью дороги / В. В. Михайлов, М. Г. Солодка // Механика машин, механизмов и материалов. 2010. № 4 (13). С. 18–23.
8. Guclu, R. Neural Network Control of Non-Linear Full Vehicle Model Vibrations [Electronic resource] / R. Guclu, K. Gulez // Vibration Control. Croatia: Sciyo, 2010. Mode of access: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/11900.pdf>. Date of access: 15 September 2015.
9. Автомобили: конструкция, конструирование и расчет. Системы управления и ходовая часть / Д. М. Ломако [и др.]; под ред. А. И. Гришкевича. Минск: Вышэйш. шк. 1987. 200 с.
10. Михайлов, В. В. Математическая идентификация электромагнитного клапана с пропорциональным управлением / В. В. Михайлов // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. Минск: ОИМ НАН Беларуси, 2013. Вып. 2. С. 136.
11. Михайлов, В. В. Математическое моделирование в изучении переходных процессов и нагруженности элементов гидроусилителя руля с роторным распределителем / В. В. Михайлов, Е. Я. Строк // Наука и техника. 2013. № 1. С. 18–23.
12. Ляхов, С. В. Метод экспресс-диагностики пилотной части пропорционального электромагнитного клапана / С. В. Ляхов, А. Г. Снитков, В. В. Михайлов // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. Минск: ОИМ НАН Беларуси, 2014. Вып. 3. С. 132–138.

REFERENCES

1. Burian Yu. A., Sorokin V. N. (2007) *Control Over Angular Oscillations of Vehicles. Mekhatronika, Avtomatizatsia, Upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], (6), 36–40 (in Russian).
2. Yoshimura T., Matumura S., Kurimoto M., Hino J. (2002) Active Suspension System of One-Wheel Car Models Using the Sliding Mode Control with VSS Observer. *International Journal of Vehicle Autonomous System*, 1 (1), 133–152. DOI: 10.1504/IJVAS.2002.001809.
3. Hac A., Bodie M. O. (2002) Improvements in Vehicle Handling. *International Journal of Vehicle Autonomous System*, 1 (1), 83–109. DOI: 10.1504/IJVAS.2002.001807.
4. Mikhailau V. V., Basalaev V. N., Snitkov A. G., Sorochan V. M. (2012) Mathematical Model of Automatic Transmission in the Structure of Test Complex. *Mekhanika Mashin, Mekhanizmov i Materialov* [Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials], 2 (19), 22–28 (in Russian).
5. Mikhailau V. V. (2013) Investigations on Mobile Machine Turning on Uneven Road with the Help of Plane Complex Model. *Mekhanika Mashin, Mekhanizmov i Materialov* [Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials], 3 (24), 20–27 (in Russian).
6. Mikhailau V. V., Snitkov A. G. (2012) Complex System for Debugging and Diagnostics of Algorithms for Automatic Control Systems of Hydro-Mechanical Transmissions. *Aktualnye Voprosy Mashinovedeniia. Sb. Nauch. Tr.* [Actual Problems in Machine Science. Collection of Research Papers]. Minsk: Joint Institute of Mechanical Engineering, National Academy of Sciences of Belarus, Part 1, 316–319 (in Russian).
7. Mikhailau V. V., Solodkaya M. G. (2010) Formation of Oscillation Impact and Calculation of Loads in the Contact Zone of Vehicle Wheels with Uneven Road Surface. *Mekhanika Mashin, Mekhanizmov i Materialov* [Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials], 4 (13), 18–23 (in Russian).
8. Guclu R., Gulez K. (2010) Neural Network Control of Non-Linear Full Vehicle Model Vibrations. *Vibration Control*. Sciyo, Croatia. Available at: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/11900.pdf>. (Accessed 15 September 2015).
9. Lomako D. M., Avtushko V. P., Belenkii Iu. Iu., Beliaev V. M., Kapustin V. V., Meliuk N. F., Moliboshko L. A. (1987) *Automobiles: Design, Design Engineering and Calculation. Steering System and Running Gear*. Minsk, Vesheyskaya Shkola. 200 p. (in Russian).
10. Mikhailau V. V. (2013) Mathematical Identification of Solenoid-Operated Valve with Proportional Control. *Aktualnye Voprosy Mashinovedeniia. Sb. Nauch. Tr.* [Actual Problems in Machine Science. Collection of Research Papers]. Minsk: Joint Institute of Mechanical Engineering, National Academy of Sciences of Belarus, Part 2, 136 (in Russian).
11. Mikhailau V. V., Strok E. Ya. (2013) Mathematical Simulation for Studying Transitional Processes and Loading of Elements of Hydraulic Power Steering with Rotor Distributor. *Nauka i Tekhnika* [Science and Technique], (1), 18–23 (in Russian).
12. Liakhov S. V., Snitkov A. G., Mikhailau V. V. (2014) Instant Diagnosis Method for Pilot Part of Proportional Solenoid-Operated Valve. *Aktualnye Voprosy Mashinovedeniia. Sb. Nauch. Tr.* [Actual Problems in Machine Science. Collection of Research Papers]. Minsk: Joint Institute of Mechanical Engineering, National Academy of Sciences of Belarus, Part 3, 132–138 (in Russian).

Поступила 16.02.2015

Подписана в печать 03.04.2015

Опубликована онлайн 22.01.2016

Received: 16.02.2015

Accepted: 03.04.2015

Published online: 22.01.2016

Структурообразование сплавов на железной основе после лазерного легирования

Кандидаты техн. наук О. В. Дьяченко¹⁾, М. А. Кардаполова¹⁾,
инж. Н. Ю. Маркевич¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Статья посвящена изучению влияния режимов лазерной обработки газотермических и клеевых покрытий из самофлюсующихся порошков на железной основе после оплавления с модифицирующими обмазками на их шероховатость и фазовый состав. Для исследования влияния параметров на микрогеометрию покрытий использован один из методов математического планирования – метод полного факторного эксперимента. В результате проведенных исследований прослежена общая закономерность, не зависящая от вида легирующей обмазки: с увеличением скорости луча лазера относительно обрабатываемой детали, диаметра луча значение параметра Ra становится меньше. Уменьшение высоты неровностей поверхности с ростом скорости луча лазера связано с интенсификацией процессов испарения. Увеличение диаметра луча уменьшает параметр Ra поверхности. Это связано с уменьшением плотности мощности при большей степени расфокусирования луча. Коэффициент перекрытия не оказывает заметного влияния на параметр Ra оплавляемых покрытий. С увеличением скорости движения луча лазера относительно детали структура из дендритной превращается в пересыщенную с выделениями карбидов и боридов. Установлено, что технологические параметры лазерной обработки, в частности скорость луча лазера, влияют на состав покрытий. С увеличением скорости до $v_5 = 5 \cdot 10^{-3}$ м/с количество хрома стало больше в 1,5 раза, что привело к повышению микротвердости покрытия от 9,5–10,1 до 11,04–15,50 ГПа.

Ключевые слова: сплавы, структурообразование, лазерное легирование, железная основа

Для цитирования: Дьяченко, О. В. Структурообразование сплавов на железной основе после лазерного легирования / О. В. Дьяченко, М. А. Кардаполова, Н. Ю. Маркевич // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 1. С. 46–51

Structure Formation of Alloys on Iron Basis After Laser Alloying

О. V. Diachenko¹⁾, M. A. Kardapolova¹⁾, N. Yu. Markevich¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper is devoted to investigations on influence of laser treatment regimes of gas-thermal and adhesive coatings from self-fluxing powders on iron basis and after melting with modifying plaster on their roughness and phase composition. One of mathematical planning methods that is a complete factor experiment method has been used for investigation of parameters' influence on micro-geometry of coatings. The executed investigations have made it possible to observe a general regularity which does not depend on a type of alloying plaster: while increasing speed of laser beam relatively to treated part, beam diameter value of Ra parameter is becoming less. Decrease in height of surface irregularities in case of increasing laser beam speed is related with intensification of evaporation processes. An increase in beam diameter diminishes Ra parameter of the surface. This is due to the fact that decrease in power density occurs at high rate of beam defocusing. Overlapping coefficient does not exert a pronounced effect on Ra parameter of fused coatings. While increasing the speed of laser beam relatively to the part structure is transferred from dendrite into supersaturated one with carbide and boride precipitations. It has been

Адрес для переписки

Дьяченко Ольга Владимировна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-95-04
tiro@bntu.by.ru

Address for correspondence

Diachenko Olga V.
Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-95-04
tiro@bntu.by.ru

established that technological parameters of laser treatment and particularly speed of laser beam influence on coating composition. While increasing the speed up to $v_5 = 5 \cdot 10^{-3}$ m/s amount of chromium has become larger by 1.5-fold that resulted in increase of micro-hardness of the coating from 9.5–10.1 GPa up to 11.04–15.50 GPa.

Keywords: alloys, structure formation, laser alloying, iron basis

For citation: Diachenko O. V., Kardapolova M. A., Markevich N. Yu. (2016) Structure Formation of Alloys on Iron Basis after Laser Alloying. *Science & Technique*. 15 (1), 46–51 (in Russian)

Введение

Обеспечение длительного срока службы режущего инструмента для нарезания гастрономических продуктов, его надежности и стойкости, определяющих длительность и эффективность его эксплуатации, зависит в первую очередь от механических свойств рабочих поверхностей инструмента. В последнее время пристальное внимание уделяется разработкам самофлюсующихся сплавов на железной основе, содержащих бор и кремний. Эти материалы можно считать более перспективными при получении дешевых покрытий, чем порошки на никелевой основе [1].

Для изучения формирования покрытий интересно изучить влияние режимов лазерной обработки и легирующих компонентов на фазовый состав и микрогеометрию покрытий [1–8]. При лазерном упрочнении и легировании след (дорожка) лазерного воздействия имеет в поперечном сечении форму пика, высота которого зависит от режимов обработки.

Цель настоящей работы – исследовать шероховатость и фазовый состав покрытий (после плазменного напыления и клеевых покрытий) самофлюсующегося сплава на железной основе.

Методика исследований

Опыты проводили на образцах $\varnothing 50$ мм из стали 40Х. В качестве материала для напыления использовали самофлюсующийся сплав из порошка ПР-Х4Г2Р4С2Ф следующего химического состава: 83,1–87,6 % Fe, 3,3–4,3 % В, 3,5–4,5 % Cr, 2,0–2,5 % Si, 2,0–2,5 % Mn, 1,0–1,2 % С, 0,5–0,9 % V, 0,05–0,5 % Al, 0,05–0,5 % Cu.

Подслой наносили на поверхность методом плазменного напыления с использованием установки УПУ-3Д с источником питания ИПН-160/600 и плазмотроном ПП-25 на режимах: $I = 250$ А; $U = 80$ В; $p = 0,6$ МПа. Толщина

слоя 0,6 мм. Клеевое покрытие наносили на связке (3 % клея АГО в ацетоне).

Легирующие элементы наносили на поверхность плазменно напыленных покрытий в виде порошковых обмазок В₄С, ТаВ, МоВ на клеевой связке (3 % клея АГО в ацетоне) [2, 3]. Толщина слоя обмазки составляла 0,09–0,11 мм и контролировалась толщиномером МТ-40НЦ. Оплавление осуществляли с помощью непрерывного лазера ЛГН-702 мощностью $N = 800$ Вт при диаметрах лазерного луча $d_1 = 1,0 \cdot 10^{-3}$ м; $d_2 = 3,0 \cdot 10^{-3}$ м, со скоростями перемещения $v_1 = 0,83 \cdot 10^{-3}$ м/с; $v_2 = 1,67 \cdot 10^{-3}$ м/с; $v_3 = 3,33 \cdot 10^{-3}$ м/с; $v_4 = 5 \cdot 10^{-3}$ м/с; $v_5 = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м/с, с коэффициентами перекрытия $k_1 = 0,8$ и $k_2 = 1,2$ с целью получения единого фазового состава и заданных свойств по всей толщине покрытия.

После напыления и оплавления измеряли шероховатость образцов профилографом-профилометром по ГОСТ 2789–73. Точечный микрорентгеноспектральный анализ (МРСА) проводили на рентгеновском микроскопе МРЭМ-200. Микрошлифы травили в 5%-м растворе пикриновой кислоты в спирте, затем в 5%-м растворе азотной кислоты в спирте.

Для исследования влияния параметров на структуру и некоторые физико-механические свойства покрытий использовали один из методов математического планирования – метод полного факторного эксперимента [9, 10]. Поскольку число варьируемых параметров невелико, оказалось возможным реализовать полную реплику, в которой число опытов равно 2 в степени, равной числу факторов ($N = 2k$), позволяющую в ходе эксперимента варьировать одновременно несколькими параметрами различной физической природы и получать отдельную, независимую оценку коэффициентов, что невозможно, например, при реализации дробной реплики. При этом необходимо, чтобы все независимые переменные, влияющие на процесс,

изменялись на двух уровнях: минимальном и максимальном.

Серия состояла из восьми основных опытов. Полученная модель считалась линейной и учитывала взаимодействие факторов

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + B_{12}X_1X_2 + B_{13}X_1X_3 + B_{23}X_2X_3, \quad (1)$$

где Y – параметр оптимизации; X_i – варьируемые факторы; B_{ij} – коэффициенты регрессии, описывающие направление и степень влияния каждого из факторов на параметры оптимизации; X_1 – нормированное значение скорости перемещения лазерного луча (фактически производилось перемещение образца под лучом); X_2 – то же диаметра луча лазера в месте соприкосновения с поверхностью материала; X_3 – то же коэффициента перекрытия лазерных дорожек, т. е. отношение шага поперечной подачи (расстояние между средними линиями дорожек) к диаметру пятна.

Если фактор $X_3 < 1$, то происходило двукратное воздействие лазерного луча на часть поверхности металла.

Результаты исследований и их обсуждение

Рассмотрим особенности формирования микрорельефа поверхности, подвергнутой лазерному воздействию. Лазерная дорожка в поперечном сечении обычно имеет форму пика, высота которого зависит от режима обработки. По обе стороны от возвышения дорожки расположены углубления, причем их суммарный объем значительно меньше объема возвышения. Это можно объяснить увеличением объема материала, имеющим место при мартенситных превращениях.

Особенности изменения параметра Ra покрытий необходимо учитывать при выборе оптимальных режимов лазерного оплавления, поскольку знание закономерностей формирования микрорельефа позволяет оперативно управлять качеством поверхности [6]. Оценка проведена по значению параметра Ra , которое измерено вдоль и поперек лазерной дорожки. Поскольку такое значение Ra служит оценочным параметром, используемым при назначении припуска,

особое внимание уделяли именно этой характеристике.

При малых значениях скорости луча лазера $v_1 = 0,83 \cdot 10^{-3}$ м/с и плотности мощности $q = 1,01 \cdot 10^9$ Вт/м² в случае оплавления плазменных покрытий без легирования среднее арифметическое отклонение Ra имеет наивысшее значение – 49 мкм. С увеличением скорости до $v_4 = 5 \cdot 10^{-3}$ м/с и при $q = 1,01 \cdot 10^9$ Вт/м² значение параметра Ra уменьшилось до 39 мкм. Для клеевого покрытия без легирования при тех же скоростях луча лазера величина Ra варьировалась от 50 до 42 мкм.

В случае лазерного легирования плазменных покрытий TaB, MoB и B₄C для проведения эксперимента выбрали план $N = 2^3$ для трех качественных факторов (скорость луча лазера, диаметр луча, коэффициент перекрытия). Результаты планируемого эксперимента обработаны на ЭВМ. Полученные уравнения регрессии приведены в табл. 1.

Таблица 1

Уравнения регрессии, связывающие параметр Ra оплавленной поверхности и режимы лазерной обработки

Regression equation connecting Ra parameter of fused coating and laser treatment regimes

Легирующий элемент	Уравнение регрессии	Параметр Ra , мкм
TaB	$Y = 0,055 - 0,0102X_1 - 0,0055X_2 + 0,0048X_3 - 0,001X_1X_3 + 0,0015X_1X_2X_3$	45–54
MoB	$Y = 0,06 - 0,0079X_1 - 0,00588X_2 + 0,0011X_3 - 0,00188X_1X_2 + 0,0006X_1X_2X_3$	46–70
B ₄ C	$Y = 0,056 - 0,0066X_1 - 0,00388X_2 + 0,0011X_3$	34–50

По уравнениям регрессии построены зависимости Ra от параметров лазерного легирования (рис. 1).

Прослежена общая закономерность – с увеличением скорости луча лазера и диаметра луча значение параметра Ra уменьшается. Снижение высоты неровностей поверхности с ростом скорости луча лазера связано с интенсификацией процессов испарения. Уменьшение параметра Ra с увеличением диаметра луча связано со снижением плотности мощности при увеличении степени расфокусирования луча.

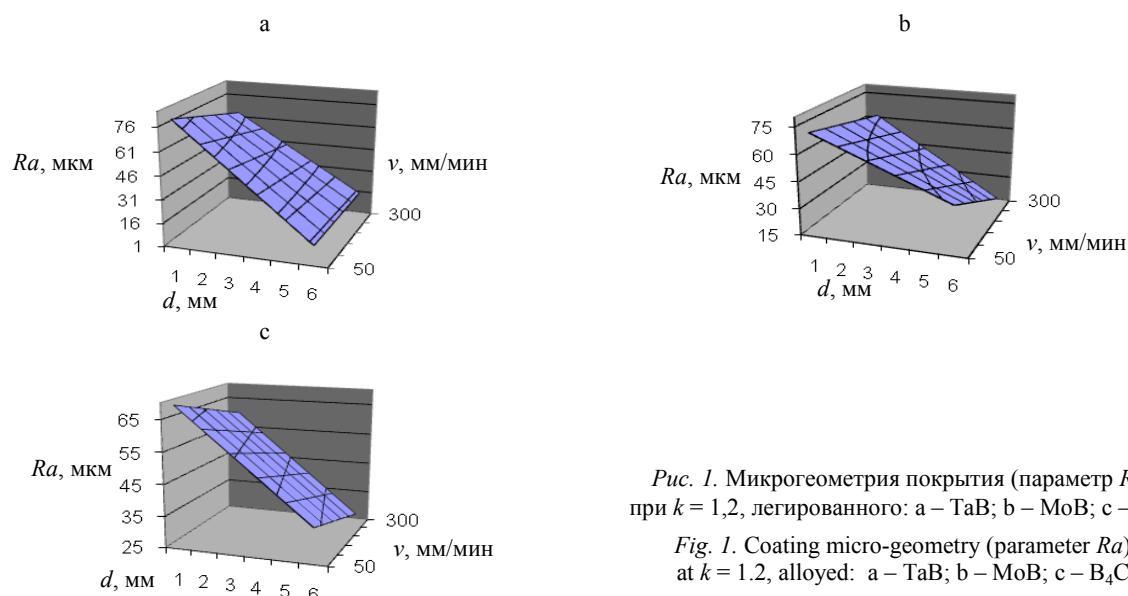


Рис. 1. Микрогеометрия покрытия (параметр Ra) при $k = 1,2$, легированного: а – TaB; б – MoB; в – B_4C

Fig. 1. Coating micro-geometry (parameter Ra) at $k = 1,2$, alloyed: а – TaB; б – MoB; в – B_4C

Коэффициент перекрытия не оказывает заметного влияния на параметр Ra оплавляемых покрытий. При обработке с коэффициентом перекрытия 0,8 при наложении второй дорожки происходит оплавление первичного «гребешка» и образование вторичного ближе к центру первой дорожки. В результате рельеф поверхности представляет собой чередование «первичных» впадин и «вторичных» гребешков. Но не замечено какого-либо существенного изменения микронеровностей.

Установлено, что Ra зависит не только от лазерной обработки, но и от состава легирующего компонента. Это происходит из-за того, что легирующие вещества меняют коэффициент поверхностного натяжения, а образовавшиеся вследствие термокапиллярного эффекта после остывания обрабатываемой поверхности микронеровности также изменяются. Параметр Ra уменьшался от 49 мкм в покрытиях без легирования до 34 мкм в покрытиях после легирования B_4C . Из всего перечисленного выше следует: максимальный припуск на механическую обработку необходим после лазерного оплавления клеевых покрытий без легирования, а минимальный – после лазерного легирования карбидом бора.

При исследовании режимов лазерной обработки на микроструктуру покрытий использовали точечный МРСА. Образцы оплавливали по режимам: $v_1 = 1,67 \cdot 10^{-3}$ м/с; $d = 1,0 \cdot 10^{-3}$ м; $k = 0,8$ и $v_2 = 5 \cdot 10^{-3}$ м/с; $d = 1,0 \cdot 10^{-3}$ м; $k = 0,8$ (табл. 2).

При обработке более жестким режимом (образец № 1) преобладающая структура – мелкие дендриты, ориентированные в направлении теплоотвода. При более мягком режиме (образец № 2) структура представляет собой пересыщенный твердый раствор с вкраплениями карбидов и боридов. Измерения проводили по телу дендрита и в междендритном пространстве (рис. 2а, б).

Таблица 2

Анализ структурных составляющих покрытия
Analysis of coating structural components

Элемент		Содержание составляющих, %				
Образец	Точка	Cr	Si	Mn	V	Fe
Область дендритов, образец № 1	1	3,28	1,01	1,77	1,05	Основа
	2	3,18	1,38	1,97	0,90	
	3	3,99	0,82	1,50	0,99	
	4	3,82	0,57	1,50	0,91	
	5	2,95	1,00	1,81	0,91	
	6	2,46	0,79	1,30	0,45	
	7	8,15	0,40	1,17	0,76	
	8	3,81	0,68	1,39	0,58	
Область карбидов, образец № 2	9	5,18	0,37	1,56	1,27	Основа
	10	5,14	0,50	1,67	0,89	
	11	3,42	0,57	1,97	1,12	
	12	4,12	0,52	1,42	0,60	
	13	5,71	0,81	1,35	0,83	
	14	5,63	0,29	1,21	0,80	
	15	4,48	0,46	1,22	0,57	
	16	3,04	0,87	1,84	0,85	
	17	5,02	0,43	1,05	0,79	
	18	4,11	1,23	1,86	0,77	
	19	5,48	0,82	1,17	0,83	

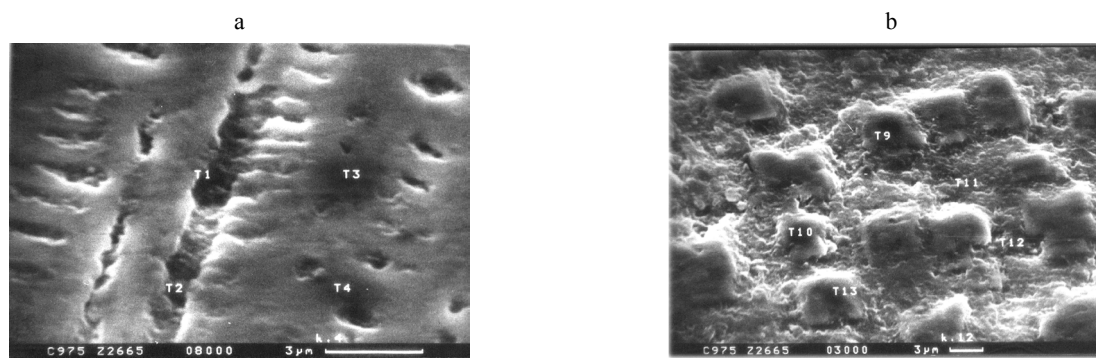


Рис. 2. Микроструктура покрытий, полученных оплавлением порошка ПР-Х4Г2Р4С2Ф, легированного В₄С при:
а – $v_1 = 0,83 \cdot 10^{-3}$ м/с; б – $v_2 = 5 \cdot 10^{-3}$ м/с

Fig. 2. Micro-structure of coatings obtained due to melting of ПР-Х4Г2Р4С2Ф powder alloyed by В₄С at:
а – $v_1 = 0,83 \cdot 10^{-3}$ m/s; б – $v_2 = 5 \cdot 10^{-3}$ m/s

Из данных табл. 2 следует, что дендриты обогащены хромом. Дендриты первого порядка (режим I, рис. 2а) закристаллизовались в первую очередь и максимально обогащены хромом (3,18–3,98 %). Дендриты второго порядка менее обогащены легирующими веществами, в частности хромом (3,28 %). Микротвердость дендритов составила 9,5–10,1 ГПа. В междендритной области количество V и Cr свидетельствовало о смеси фаз, в том числе боридов и карбидов хрома и ванадия; причем хрома, кремния, марганца и ванадия несколько меньше, чем в дендритной. Микротвердость в данном случае уменьшилась до 6,8 ГПа. С приближением к основе наблюдалось некоторое снижение хрома в дендритах от 3,18–3,28 до 2,46–2,95 %, а также Si от 1,01–1,38 до 0,79–1,00 %, что и уменьшает микротвердость до 8,4–8,9 ГПа. В точке T7 (дендрит) наблюдался резкий скачок содержания Cr до 8,15 % и уменьшение количества до 0,40 %. Это свидетельствует об образовании карбида хрома Cr₇C₃. Микротвердость основы колебалась незначительно (от 3,9 до 4,3 ГПа).

При повышенной скорости сканирования лучом лазера (режим II: $v_2 = 5 \cdot 10^{-3}$ м/с, $d_1 = 1,0 \cdot 10^{-3}$ м, $k_1 = 0,8$, рис. 2б) в структуре наблюдались избыточные выделения боридов и карбидов размером примерно 5–8 мкм.

В пересыщенной карбида-боридной фазе (рис. 2б) отмечены резкое (в 1,5 раза) повышение содержания хрома и снижение примерно в 2,5–2,7 раза кремния. Микротвердость данной фазы возросла до 11,04–15,45 ГПа. В твер-

дом растворе содержание хрома уменьшилось (3,04–4,12 %), содержание кремния также снизилось до 0,87–1,23 %, что и привело к уменьшению микротвердости до 6,77–7,95 ГПа. Микротвердость в переходной зоне между покрытием и основой составила 5,84–6,13 ГПа, микротвердость основы 4,12 ГПа.

Параметры лазерной обработки сыграли существенную роль в изменении микроструктуры, микротвердости и химического состава получаемых покрытий. С увеличением скорости луча лазера структура из дендритной превратилась в пересыщенную с выделениями карбидов и боридов. При этом в покрытии повысилось содержание хрома, снизилось содержание кремния, а микротвердость возрасла.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что на значение *Ra* оказывают влияние легирующие добавки, но в большей степени параметры лазерной обработки. Это происходит следующим образом: с ростом скорости луча лазера высота неровностей поверхности снижается; увеличение диаметра луча уменьшило микрогеометрию поверхности; коэффициент перекрытия не оказал заметного влияния на микрогеометрию оплавляемых покрытий.

2. С увеличением скорости движения луча лазера относительно детали структура из дендритной превращается в пересыщенную с выделениями карбидов и боридов. При этом в покрытии наблюдается повышение содержания хрома и снижение количества кремния.

3. Установлено, что технологические параметры лазерной обработки, в частности скорость луча лазера, влияют на состав покрытий. Покрытие, оплавленное на скорости $v_1 = 0,83 \cdot 10^{-3}$ м/с при плотности мощности $q = 1,01 \cdot 10^9$ Вт/м², представляет собой смесь α - и γ -железа, обогащенного Cr (3,18–3,98 %). С ростом скорости до $v_5 = 5 \cdot 10^{-3}$ м/с количество Cr увеличилось в 1,5 раза, что привело к повышению микротвердости покрытия от 9,5–10,1 до 11,04–15,5 ГПа.

4. По результатам исследований установлено, что максимальный припуск на механическую обработку необходим после лазерного оплавления клеевых покрытий без легирования, а минимальный – после лазерного легирования карбидом бора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Особенности образования структуры в сталях, подвергнутых лазерному поверхностному легированию / А. Б. Лысенко [и др.] // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1995. № 12. С. 10–12.
2. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров / под ред. А. Г. Григорьянца. М.: Изд-во МГТУ имени Н. Э. Баумана. 2006. 664 с.
3. Коваленко, В. С. Прогрессивные методы лазерной обработки материалов / В. С. Коваленко. Киев: Вища шк., 1985. 88 с.
4. Декер, И. Промышленное применение лазера / И. Декер // Семинар в Брауншвейге (Германия). 1990. С. 351–355.
5. Астапчик, С. А. Высокоэнергетические методы обработки материалов (лазер, электроэрозия, магнитное поле, водяная струя высокого давления, электротермия) / С. А. Астапчик // *Весті НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук*. 2002. № 1. С. 39–48.
6. Свойства, получение и применение тугоплавких соединений / А. Г. Алексеев [и др.] // Под ред. Т. Я. Косолаповой. М.: Металлургия, 1986. 928 с.
7. Савицкий, Е. М. Тугоплавкие металлы и сплавы / Е. М. Савицкий, Г. С. Бурханов, К. Б. Поварова. М.: Металлургия, 1986. С. 116.
8. Стерин, И. С. Машиностроительные материалы. Основы металловедения и термической обработки / И. С. Стерин. СПб.: Изд-во «Политехника», 2003. 343 с.
9. Вознесенский, В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В. А. Вознесенский. М.: Финансы и статистика, 1991. 264 с.
10. Каледин, Б. А. Планирование экспериментов в порошковой металлургии. Минск: Изд-во БПИ, 1982. Ч. I: Планы первого порядка. 61 с.

Поступила 12.03.2015

Подписана в печать 15.05.2015

Опубликована онлайн 22.01.2016

REFERENCES

1. Lysenko A. B., Kozina N. N., Miroshnichenko I. S., Borisova G. V. (1995) Peculiar Features in Structure Formation of Steels Subjected to Laser Surface Alloying. *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov* [Metal Science and Thermal Treatment of Metals], (12), 10–12 (in Russian).
2. Grigoryants A. G., Shiganov I. N., Misiurov A. I. (2006) *Technological Processes of Laser Treatment*. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University. 664 p. (in Russian).
3. Kovalenko V. S. (1985) *Progressive Methods for Material Laser Treatment*. Kiev, Visha Shkola. 88 p. (in Russian).
4. Deker I. (1990) Industrial Laser Application. *Workshop in Braunschweig* (Germany), 351–355.
5. Astapchik S. A. (2002) High-Energy Methods for Material Treatment (Laser, Electro-Erosion, Magnetic Field, High-Pressure Water Jet, Electrothermy). *Izvestiia Natsionalnoi Akademii Nauk Belarusi. Ser. Fiziko-Tekhnicheskikh Nauk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physico-Technical Series], (1), 39–48 (in Russian).
6. Alekseev A. G., Bovkun G. A., Bolgar A. S., Borisova A. L., Brakhnova I. T., Vinitskii I. M., Tordienko S. P. (1986) *Properties, Obtaining and Application of High-Melting Compounds: Reference Book*. Moscow, Metallurgiya. 928 p. (in Russian).
7. Savitsky E. M., Burkhanov G. S., Povarova K. B. (1986) *High-Melting Metals and Alloys*. Moscow, Metallurgiya, 116. (in Russian).
8. Sterin I. S. (2003) *Engineering Materials. Fundamentals of Metal Science and Thermal Treatment*. Saint-Petersburg, Publishing House "Politekhnik". 343 p. (in Russian).
9. Voznesensky V. A. (1991) *Statistical Methods for Experiment Planning in Technical and Economical Investigations*. Moscow, Publishing House "Finansy i Statistika". 264 p. (in Russian).
10. Kaledin B. A. (1982) *Planning of Experiments in Powder Metallurgy. Vol. I: Plans of 1st Order*. Minsk: Publishing House of Belarusian Polytechnical Institute. 61 p. (in Russian).

Received: 12.03.2015

Accepted: 15.05.2015

Published online: 22.01.2016

Снижение вероятности образования транспортных заторов на дорогах высших категорий управлением доступом к сети

Канд. техн. наук, доц. Р. Ю. Лагереv¹⁾, канд. техн. наук Д. В. Капский²⁾

¹⁾ Иркутский государственный технический университет (Иркутск, Российская Федерация),

²⁾ Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Места слияния транспортных потоков на дорогах высших категорий являются наиболее «узкими» участками сети, качество функционирования которых определяет вероятность образования транспортных заторов. Исследования по изучению заторовых ситуаций в зоне слияния рамповых и магистральных потоков показали, что плотный рамповый поток ведет к образованию «турбулентности» по причине перестроения транспортных средств и снижения их скорости на главном направлении. При высокой плотности движения на магистральном направлении «турбулентность» приводит к образованию динамического удара в основном потоке. Доказано, что в сравнении с магистральным потоком воздействие рампового потока на вероятность образования затора намного сильнее. Установлено, что в зоне слияния потоков часть транспортных средств, движущихся по магистрали, занимает одновременно две полосы движения, снижая пропускную способность используемого участка магистрали. Эту особенность важно учитывать и принимать во внимание на участках образования «турбулентности». Представлены основные подходы, методология, принципы и этапы управления доступом к дорогам высших категорий, направленные на повышение качества их функционирования, включая вопросы повышения безопасности дорожного движения. Предложена методика, позволяющая оценить и оптимизировать управление рампами с точки зрения минимизации суммарных длин очередей транспортных средств на примыкающих въездах в контексте снижения вероятности транспортных заторов.

Ключевые слова: O–D-матрицы, рекуррентные транспортные заторы, интеллектуальные транспортные системы, управление доступом к сети, пропускная способность магистралей, магистральные рампы, транспортный спрос

Для цитирования: Лагереv, Р. Ю. Снижение вероятности образования транспортных заторов на дорогах высших категорий управлением доступом к сети / Р. Ю. Лагереv, Д. В. Капский // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 1. С. 52–60

Reduction in Probability of Traffic Congestion on High-Class Road Using Ramp Access Control

R. Yu. Lagerev¹⁾, D. V. Kapsky²⁾

¹⁾Irkutsk State Technical University (Irkutsk, Russian Federation),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Merging traffic junctions on high-class roads are considered as bottlenecks in the network and quality of their operation determines a probability for formation of traffic congestions. Investigations on congestion situations in the merging zones of ramp and freeway traffic flows have demonstrated that queuing ramp traffic flow leads to formation of so called “turbulence” effect due to re-arrangement of transport facilities and reduction in their speed on main road direction. Having high queuing traffic flow on main road the “turbulence” component can result in formation of an impact blow in the main traffic flow. It has been proved that an impact of the ramp traffic flow on congestion probability is higher in comparison with main road traffic flow. The paper makes it possible to establish that some transport facilities moving along a high-way simultaneously occupy two lanes in the merging traffic zones and they reduce capacity of the used road section. It is necessary to take into account this specific feature and it is necessary to pay attention to it in the zones of “turbulence” effect formation. The paper presents main approaches, methodology, principles and stages required for access control of high-class roads which

Адрес для переписки

Капский Денис Васильевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-48-06
d.kapsky@gmail.com

Address for correspondence

Kapsky Denis V.
Belarusian National Technical University
12 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-48-06
d.kapsky@gmail.com

are directed on higher quality of their operation including improvement of road traffic safety. The paper proposes a methodology that allows to evaluate and optimize ramp control in the context of a transport queue length minimization at adjoining ramps for the purposes of probability reduction in transport congestion.

Keywords: O–D-trip matrices, recurrent traffic congestions, intelligent transportation systems, network access management, highway capacity, main road ramps, traffic demand

For citation: Lagerev R. Yu., Kapsky D. V. (2016) Reduction in Probability of Traffic Congestion on High-Class Road Using Ramp Access Control. *Science & Technique*. 15 (1), 52–60 (in Russian)

8 октября 2014 г. в Новосибирске в ходе состоявшейся рабочей встречи участники обсудили необходимость возобновления работ в рамках реализации соответствующих федеральных целевых программ на региональных и муниципальных уровнях. Переговоры прошли в конструктивной и доброжелательной атмосфере. Есть уверенность, что достигнутые договоренности придадут дополнительный импульс дальнейшему развитию транспортной инфраструктуры многих регионов РФ. Одна из важнейших задач, обозначенных рабочей группой на ближайшую и долгосрочную перспективу, – развитие скоростных автомагистралей (далее – магистраль). В действующей нормативной документации по проектированию скоростных дорог высших категорий закладывается основной принцип их функционирования: обеспечение обособленного и безопасного движения транспортного потока – все это можно обеспечить, лишь выполняя требования современных руководств по управлению доступом к скоростным дорогам. Именно поэтому просматривается наличие тенденций развития методов управления магистральными улицами и дорогами с применением адаптивного регулирования с автоматическим мониторингом характеристик транспортных потоков. Существующие

в России подходы к применению адаптивного регулирования реализуемы главным образом для свободного движения (free flow speed).

Как отмечается в специальной технической литературе [1–3], эффективность «классического» адаптивного регулирования резко снижается в случае функционирования связанных регулируемых пересечений в условиях насыщения (saturated) и перенасыщения (oversaturated). Дороги высших категорий должны пропускать большие объемы городских транспортных передвижений. Принцип «концепции концентрации», являющийся неотъемлемой частью современного развития и роста многих городов, будет заложен в долгосрочные программы развития транспортных систем многих российских городов [1, 2].

Основным документом, определяющим концептуальные подходы к управлению транспортными потоками, принято считать американское руководство HCM 2010, в котором подробно изложена процедура оценки эффективности скоростных дорог, охарактеризованы условия образования транспортных заторов, сводящиеся к оценке значений плотности движения на сегментах (рис. 1) магистральной сети (табл. 1) [4].

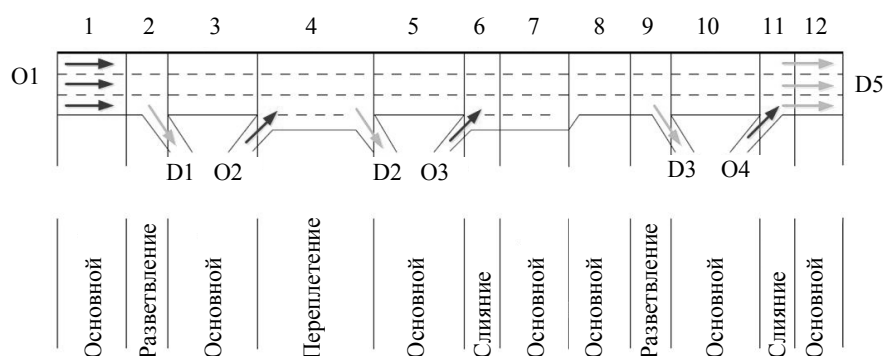


Рис. 1. Дифференциация магистрали на сегменты (HCM 2010)

Fig. 1. Differentiation of main road on segments (HCM 2010)

Рекомендованные граничные значения плотности движения потока на скоростных магистралях (НСМ 2010)

Recommended boundary values on queuing traffic flow at high-speed road (HCM 2010)

Сегмент магистрали	Показатель эффективности	Граничные значения показателя
В зоне основных участков	Плотность (авт./км/полосу)	При плотности движения >29 необходимо снижать доступность на верхних рампах
В зоне переплетения транспортных потоков		При плотности движения >21 необходимо снижать доступность на верхних рампах
В зоне слияния или разветвления потоков		

Именно НСМ 2010 открыто и предметно закладывает основу для дальнейших практических шагов по сохранению бесперебойного и безопасного движения скоростных магистральных потоков [5]. С тем чтобы создать необходимые инструментарии управления ими, возникла первостепенная задача – оценка вероятности образования рекуррентных транспортных заторов на улицах и дорогах высших категорий с учетом имеющейся информации о транспортном спросе. Задачу прогнозирования транспортных заторов можно выполнить с применением программных продуктов микро моделирования транспортных потоков или с помощью теории вероятности отказов работы в системе, что и было предпринято авторами данной статьи [6].

Результаты изучения «турбулентности» и начала образования транспортного затора на участке примыкания питающей рампы к магистральной дороге приведены на рис. 2. Магистральная улица в рассматриваемом случае представлена двумя полосами движения 1 и 2 с примыкающей рампой 0. По условиям моделирования изучалась ситуация, при которой въезд на магистральную дорогу не ограничен и организован по принципу поиска приемлемых разрывов в основных потоках 1 и 2.



Рис. 2. Изучение образования затора в зоне слияния потоков: $0 + 1 + 2 < 4600$ авт./ч; $L = 180$ м

Fig. 2. Study of traffic congestion formation in the zone of merging traffic junctions: $0 + 1 + 2 < 4600$ VPH; $L = 180$ m

Анализ выполненных видеоматериалов на участках примыкания позволил установить

пределы и условия распространения «турбулентности» в зоне взаимодействия потоков (рис. 3). Объем транспортного потока на рампе определяет поведение участников движения на крайней правой полосе 1. При увеличении значения величины потока на рампе, составляющей 15–25 % интенсивности движения магистрального потока, отмечается распространение «турбулентности» на расстояния от 50 до 300 м от зоны взаимодействия потоков. При интенсивности движения рампового потока, превышающей 26 % величины магистрального потока, «турбулентность» частично захватывает крайнюю левую полосу движения 2, способствуя значительному снижению пропускной способности полосы движения и в целом всего транспортного коридора.

Результаты моделирования участка примыкания представлены в виде графика, основная ось которого характеризует транспортный спрос на магистрали, вертикальная ось – вероятность отказа работы в системе, определяемую как начало роста очередей транспортных средств на магистрали перед зоной слияния потоков (рис. 3).

Полученные зависимости рассматриваются как вероятность образования затора от величины транспортного потока на рампе 0. Для примера, при транспортном спросе 5000 авт./ч на магистраль и 23 авт./мин (1380 авт./ч) на примыкающую рампу вероятность образования затора в течение первой минуты оценивается величиной 29 %. Следовательно, в случае постановки задачи снижения вероятности отказа системы необходимо уменьшить поток на примыкающей рампе, например до величины отказа 20 %. Реализовать выполнение рассматриваемых выше условий на практике возможно с применением систем управления доступом к магистралям [4, 7, 8].

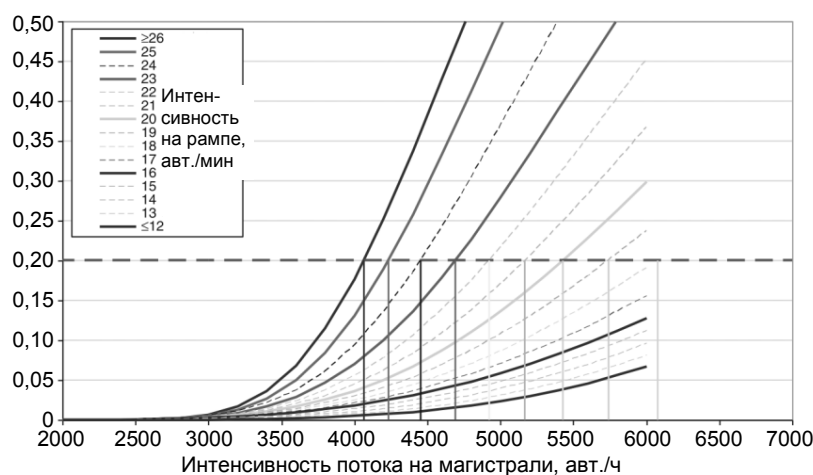


Рис. 3. Результаты оценки вероятности транспортных заторов

Fig. 3. Evaluation results on possibility of road traffic congestions

Представленные на рис. 3 зависимости позволяют при заданном уровне отказа системы многосторонне оценивать требуемое значение пропускной способности магистрали. Например, для верхней границы величины вероятности отказа 20 % пропускная способность магистрали должна равняться суммам значений интенсивности движения основного и примыкающего потоков, соответствующим значениям пунктирной горизонтальной линии (рис. 3).

Для интенсивности движения по рампе 25 авт./мин, что соответствует интенсивности 4200 авт./ч, уровень пропускной способности магистрали должен быть не менее 5700 авт./ч. Установленные эмпирические зависимости могут быть положены в основу для прогнозирования рекуррентных транспортных заторов, образующихся в местах слияния потоков, распространяющихся вверх по ходу движения.

Возможный вариант прогнозирования образования очереди с применением оценки продолжительности устойчивости системы в общем виде изложен ниже.

Функция распределения продолжительности жизненного цикла процесса

$$F(t) = 1 - S(t), \quad (1)$$

где $F(t) = p(T \leq t)$ – функция распределения «устойчивого» состояния системы; T – продолжительность устойчивости; $S(t) = p(T > t)$ – функция надежности системы.

Оценочная функция предела устойчивости системы определяется как

$$\hat{S}(t) = \prod_{t_j < t} \frac{n_j - \delta_j}{n_j}, \quad (2)$$

где n_j – количество позиций с условием $T \geq t_j$; δ_j – то же отказов в системе за время t_j .

Применительно к рассматриваемой задаче прогнозирования затора на магистрали вероятность отказа в период t определяется вероятностью образования транспортного затора при определенной величине критического потока q и его продолжительности (периода активности). Предлагается уравнение (1) принять как функцию распределения вероятности устойчивости магистрали к затору в следующем изложении:

$$F(q) = p(q_i \leq q) = 1 - p(q_i > q), \quad (3)$$

где $F(q)$ – распределение вероятности образования затора; q – фактическая интенсивность движения транспортного потока на полосу; q_i – величина транспортного потока в интервале i , способствующая снижению скорости, рассматриваемая как критическая; $p(q_i > q)$ – вероятность превышения критического потока над фактическим (вероятность отсутствия роста очередей транспортных средств).

Следовательно, уравнение (2) можно представить в виде задачи максимума правдоподобия:

$$\hat{p}(q_i > q) = \hat{S}(q) = \prod_{i: q_i \leq q} \frac{k_i - d_i}{k_i}, \quad i \in B, \quad (4)$$

где q – существующая (наблюдаемая) интенсивность движения транспортного потока на полосу; q_i – величина транспортного потока

в интервале i , способствующая снижению скорости и образованию роста очередей транспортных средств, рассматриваемая как критическая; k_i – количество интервалов (замеров) с условием $q \geq q_i$; d_i – то же нарушений в системе обслуживания потоков q_i ; B – наборы интервалов с отказами $\{B_1, B_2, B_3, \dots\}$.

Соответственно функция вероятности отказа в обслуживании потоков на магистрали примет следующий вид:

$$F(q) = 1 - \prod_{i: q_i \leq q} \frac{k_i - d_i}{k_i}, \quad i \in B. \quad (5)$$

При условии принятия дискретного влияния измеряемых величин потоков на работу системы (одно нарушение d_i на фактический интервальный поток q_i) уравнение (5) можно записать в следующем виде:

$$F(q) = 1 - \prod_{i: q_i \leq q} \frac{k_i - 1}{k_i}, \quad i \in B. \quad (6)$$

Апробация модели (6) – оценки вероятности динамического удара в потоке (в зарубежной литературе *breakdown flow*) – выполнена на примере участка улично-дорожной сети в районе левобережной транспортной развязки Академического моста в г. Иркутске, результаты которой представлены на рис. 4, 5.

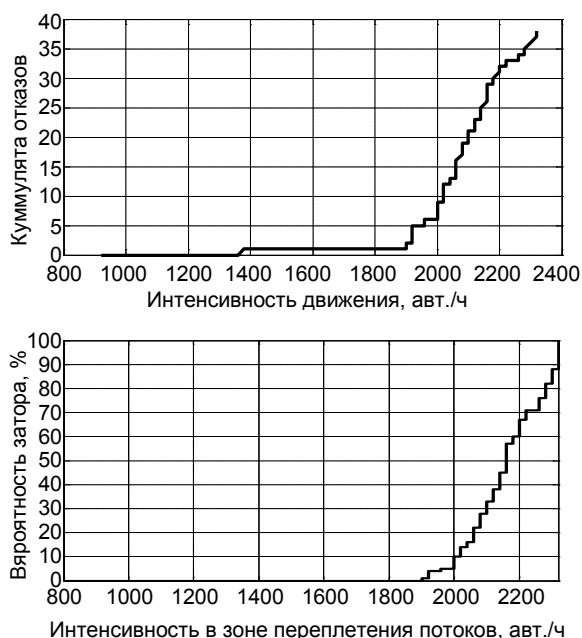


Рис. 4. Анализ отказов на подходе к Академическому мосту в г. Иркутске

Fig. 4. Failure analysis on the way to the Academician Bridge in Irkutsk

Наибольшее количество отказов в системе (15 %) зафиксировано в условиях насыщения зоны слияния (рис. 4). Начиная со значения интенсивности 33 авт./мин, отказы в системе фиксировались с частотой 3/5 (3 отказа на каждые 5 наблюдаемых интервалов). На основании вышеизложенных статистических обследований, принимая за основу зависимости (2)–(6), авторами составлен текст *m*-файла для пакета MatLab, реализующий предлагаемое решение применительно к задаче оценки вероятности распространения очереди с учетом значений интенсивности движения и функции случайных отказов в системе работы узла (рис. 5).

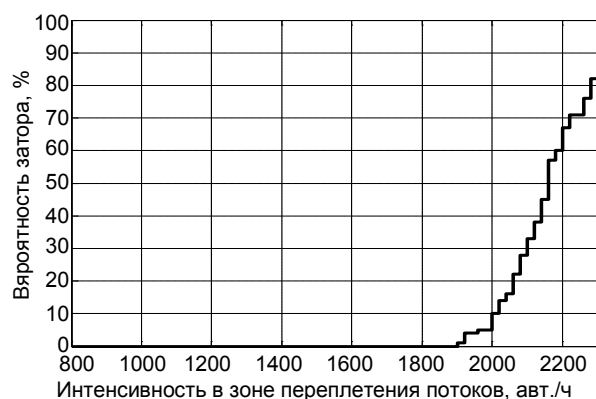


Рис. 5. Результаты моделирования вероятности транспортных заторов

Fig. 5. Simulation results on possibility of transport congestions

Сопоставительный анализ полученных результатов с данными микромоделирования рассматриваемого участка сети позволил утверждать, что модель продолжительности жизненного цикла процесса может быть принята в качестве первого приближения для оценки прогнозирования транспортных заторов и управления скоростными дорогами. Обособленное скоростное движение на магистральных улицах в условиях плотного движения можно обеспечить за счет ограничения въезда на магистраль, другими словами, за счет управления транспортным спросом. В зарубежной практике управления доступом к сети уже на протяжении многих лет уделяется внимание адаптивным методам управления транспортным спросом на скоростных магистралях, основная задача которых – снижение воздействия прижимающего/входящего на магистраль потока

с целью предупреждения образования сетевых транспортных заторов (рис. 6) [9–12].

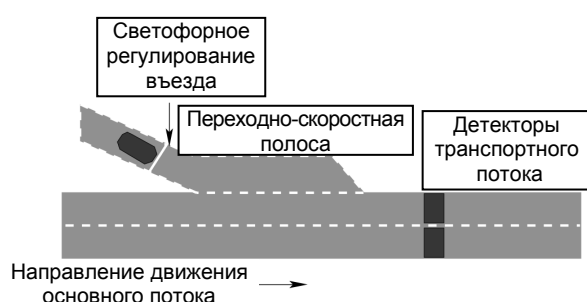


Рис. 6. Схема адаптивного управления доступом к скоростной дороге

Fig. 6. Scheme for adaptive control over access to high-speed road

Отмечается [3], что адаптивные методы управления доступом к магистрали позволяют повысить безопасность слияния транспортных потоков, пропускную способность, снизить расход топлива и выбросы токсичных веществ. В зарубежной практике используют одно- и двухполосные ramпы, характеристики обслуживания которых зависят от стратегии управления (одно транспортное средство (ТС) за разрешающий такт или несколько) (табл. 2, рис. 7).

Таблица 2

Стратегии управления регулируемым доступом на магистраль

Control strategy on regulated access to main road

Стратегия	Количество полос на ramпе	Длительность цикла регулирования, с	Пропускная способность, авт./ч	
			рампы	зоны слияния
Одно ТС за цикл	1	4,0–4,5	240–900	900
Несколько ТС за цикл	1	6,0–6,5	240–1200	1100–1200

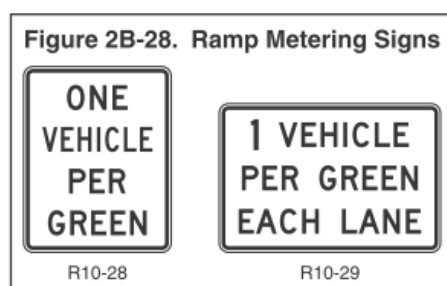


Рис. 7. Знак «Дозирование потока на магистраль» MUTCD

Fig. 7. Sign “Dosage of traffic flow to main road” MUTCD

Ограничение въезда рассматривается как наиболее эффективный инструмент обеспечения высоких скоростей движения на дорогах высших категорий, требуемой безопасности взаимодействия потоков в зоне их слияния [13, 14]. В американском руководстве посредством технического регулирования дорожного движения MUTCD отмечаются особенности применения средств светофорного дозирования потока на ramповых развязках, в общих чертах сводящиеся к следующим принципам.

1. Значительно снижаются задержки транспортных средств, движущихся по магистрали, путем их «переноса» на ramповые потоки по причине увеличения времени их обслуживания на ramпе, а также за счет повышения перепробега транспортных средств по альтернативным путям.

2. Возникает необходимость обеспечения дополнительного пространства для транспортных средств, скапливающихся на ramпе.

3. Особое внимание необходимо уделить наличию альтернативных путей проезда с соответствующей пропускной способностью для обслуживания части потоков, не попавших на ramпу.

4. Дозирование потоков применяется при наличии рекуррентных транспортных заторов, образующихся в связи с повышенным транспортным спросом на поездки, а также за счет несоответствующей условиям движения геометрии зоны переплетения потоков (отсутствие разгонно-переходной полосы и т. д.).

Основной принцип управления доступом заключается в регулировании транспортного спроса на магистраль с применением некоторого алгоритма, входными параметрами которого являются: интенсивность движения магистрального потока, скорости движения, уровень загруженности верхней и нижней частей зоны слияния потоков. Максимальная практическая пропускная способность ramповой полосы составляет 900 авт./ч с практическим минимумом 240 авт./ч.

При разработке алгоритма управления доступом к сети авторы исходили из того, что при использовании системы управления доступом к магистрали в качестве механизма повышения эффективности ее функционирования является обеспечение согласования характеристик при-

бытия и убытия транспортных средств с рампы. При этом система дозирования рампового потока должна гарантировать эффективность работы всех сегментов магистрали, из которых она состоит (рис. 2).

Алгоритм управления транспортным спросом может быть сведен к решению следующей прикладной задачи. Магистраль разбивается на несколько j -х сегментов, в каждом из которых имеется хотя бы одна питающая рампа.

Значение основного магистрального потока задается следующей зависимостью:

$$q_j = \sum_{i=1}^j \alpha_{ij} s_i, \quad \alpha_{ij} \in [0, 1],$$

где q_j – значение величины транспортного потока на j -й магистральной секции; s_i – величина вливающегося потока с i -й рампы, авт./ч; α_{ij} – доля i -го рампового потока, проходящего по j -й магистральной секции.

Условие предупреждения транспортного затора на магистрали сводится к выполнению следующего ограничения:

$$q_j \leq c_j, \forall j,$$

где c_j – пропускная способность j -й магистральной секции.

Вместе с этим величина дозирующего рампового потока ограничивается условием

$$s_{i,\min} \leq s_i \leq \min\{s_{i,\max}, d_i\},$$

где d_j – транспортный спрос на i -й рампе; $s_{j,\max}$ – пропускная способность i -й рампы.

Таким образом, оптимальное управление доступом к магистрали может соответствовать решению задачи квадратичного программирования, направленной на минимизацию длин очередей транспортных средств на прилегающих рампах при следующих смешанных ограничениях:

$$q_j \leq c_j, \forall j;$$

$$q_j \leq \sum_{i=1}^j \alpha_{ij} s_i;$$

$$s_{i,\min} \leq s_i \leq \min\{s_{i,\max}, d_i\}.$$

Решение указанной задачи реализовано в виде m -файла с применением программного комплекса Optimization Toolbox пакета MatLab R2013 в следующей постановке:

$$\min \left(\frac{1}{2} x' H x + f' x \right),$$

при ограничениях:

$$A x \leq b;$$

$$Aeq \cdot x = beq$$

и двусторонних ограничениях:

$$lb \leq x \leq ub,$$

где x – вектор оцениваемых параметров, $m \times 1$, $x \geq 0$; H – матрица Гессе, $m \times m$; f – то же коэффициенты целевой функции, $m \times 1$; A – матрица коэффициентов ограничений-неравенств, $n \times m$; Aeq – то же коэффициенты линейных ограничений-равенств, $n \times m$; b – вектор правых частей ограничений-неравенств, $n \times 1$, $b \geq 0$; beq – то же правых частей линейных ограничений-равенств, $n \times 1$; lb – то же нижних ограничений параметров, $m \times 1$, $lb \geq 0$; ub – то же верхних ограничений, $m \times 1$, $ub \geq 0$.

Матрица Гессе является симметричной и положительно определенной, элементы матрицы h_{ij} равны второй частной производной. Соответственно целевая функция должна быть выпуклой и дифференцируема. В рассматриваемой задаче управления доступом к улично-дорожной сети целевая функция является суммой квадратов остатков очередей транспортных средств, следовательно, функция дифференцируема и положительно определена.

$$H(f) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2} \end{bmatrix}.$$

В качестве основного управляющего параметра выбраны значения объемов дозирования транспортных потоков с примыкающих рамп при выполнении следующих условий:

- не допустить перегрузки сегментов магистрали;
- максимально сократить суммарную длину очереди на примыкающих рампах.

При наличии объективной информации об условиях движения транспортного потока на каждом из сегментов магистрали (интенсивность/плотность) предлагаемый алгоритм позволяет выполнять оценку вероятности начала образования затора, по значениям рампового потока, основываясь на критерии «плотность транспортных средств на полосу движения». Для каждого магистрального сегмента представлены граничные значения величин плотности движения, при которых условия движения магистрального потока могут рассматриваться как наихудшие, способствующие высокой вероятности образования затора (табл. 1).

Прежде всего необходимо отметить очевидное преимущество предлагаемой модели: матрица A имеет размерность $n > m$ – полный ранг, следовательно, задача имеет единственный локальный минимум, совпадающий с глобальным. Нужно также отметить очевидное влияние на плотность движения верхнего ограничения vub , характеризующего пропускную способность примыкающих рамп. Указанное ограничение может использоваться как эффективный инструмент управления дорогами высших категорий в контексте применения следующей известной зависимости:

$$s_i = \frac{c_i C_i}{g_i},$$

где s_i – величина потока насыщения i -й рампы, авт./ч; c_i – то же пропускной способности i -й рампы, авт./ч; C_i – то же длительности цикла режима регулирования на i -й рампе, с; g_i – длительность обслуживающего такта рамповой полосы, с.

С учетом вышеизложенного, принимая во внимание зарубежный опыт применения RMS-систем, можно воспользоваться практическими рекомендациями, представленными в руководстве HCM 2010 (табл. 1), на основании которых использовать следующие системы дозирования потоков: одно транспортное средство за разрешающий такт g_i или несколько. Принимая во внимание качество исходных данных и их влияние на параметры управления магистралью, очень важно обладать точной информацией о распределении транспорт-

ных потоков внутри магистрального коридора. Как показали результаты тестирования модели, большое влияние на качество управляющего воздействия оказывают:

- фактические значения пропускной способности сегментов магистрали b_j ;
- матрица A , характеризующая распределение рамповых потоков внутри магистрали (коридорный вход-выход).

Такую информацию можно получить расчетом существующей матрицы корреспонденций рамповых потоков на основе проведения опроса участников о маршрутах движения или регистрацией транспортных средств, что является чрезвычайно дорогой, трудоемкой, а часто и невыполнимой задачей.

ВЫВОДЫ

1. Обособленное скоростное движение на магистральных улицах в условиях плотного движения можно обеспечить за счет ограничения въезда на магистраль, другими словами, за счет управления транспортным спросом. В практике управления доступом к сети следует уделять внимание адаптивным методам управления транспортным спросом на скоростных магистралях. Основной задачей при управлении доступом к сети является снижение воздействия примыкающего/входящего на магистраль потока с целью предупреждения образования сетевых транспортных заторов.

2. На основании проведенных исследований разработаны методики оценки:

- пропускной способности для сегментов магистрали (рис. 2) с учетом возможных вариантов взаимодействия потоков;
- матриц корреспонденций рамповых потоков с учетом используемых методов фиксации разрывов в потоке, на алгоритме генетической оптимизации, являющемся наиболее устойчивым к вероятным ошибкам в исходных данных.

3. Как показали результаты тестирования модели, большое влияние на качество управляющего воздействия оказывают фактические значения пропускной способности сегментов магистрали и характеристики распределения рамповых потоков внутри магистрали (коридорный вход-выход).

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов, А. Ю. Современные тенденции проектирования и реконструкции улично-дорожных сетей / А. Ю. Михайлов, И. М. Головных. Новосибирск: Наука, 2004. 266 с.
2. Лагереv, Р. Ю. К вопросу управления транспортными потоками в условиях плотного городского движения / Р. Ю. Лагереv, С. Ю. Лагереv, И. Г. Карпов // Вестник ИргТУ. 2012. № 9 (68). С. 139–145.
3. Proactive Ramp Management under the Threat of Freeway-Flow Breakdown / L. Elefteriadou [et al.] // *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2009. Vol. 16. P. 4–14.
4. Lorenz, M. A. Probabilistic Approach to Defining Capacity and Breakdown / M. A. Lorenz, L. Elefteriadou // *Transportation Research Circular E-C018*. In: *Proceedings of the 4th International Symposium on Highway Capacity*, 27 June – 1 July 2000. P. 84–95.
5. Highway Capacity Manual (HCM) 2010 / National Research Council (U.S.). Transportation Research Board. Washington, DC.: Transportation Research Board (TRB) of the National Academies, 2010. Vol. 1–4.
6. Врубель, Ю. А. Определение потерь в дорожном движении / Ю. А. Врубель, Д. В. Капский, Е. Н. Кот. Минск: БНТУ, 2006. 240 с.
7. Lertworawanich, P. A. Methodology for Estimating Capacity at Ramp Weaves Based on Gap Acceptance and Linear Optimization / P. A. Lertworawanich, L. Elefteriadou // *Transportation Research, Part B: Methodological*. 2003. Vol. 37, Is. 5. P. 459–483.
8. Design, Field Implementation and Evaluation of Adaptive Ramp Metering Algorithms. / R. Horowitz [et al.] // *California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH)*. UC Berkeley: California Partners for Advanced Transportation Technology, 2005. UCB-ITS-PRR-2006-21.
9. Makigami, Y. On Ramp Control / Y. Makigami // *Concise Encyclopedia of Traffic and Transportation Systems*, ed. M. Papageorgiou. Oxford: Pergamon Press, 2001. P. 285–289.
10. Papageorgiou, M. Freeway Ramp Metering: an Overview / M. Papageorgiou, A. Kotsialos // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2002. Vol. 3, No 4. P. 271–281.
11. Newman, L. Freeway Ramp Control – What it Can and Cannot Do / L. Newman, A. Dunnet, J. Meirs // *Freeway Operation Department, District 7: Los Angeles: California Division of Highways*. California, 1969. 23 p.
12. Papageorgiou, M. ALINEA: A Local Feedback Control Law for On-Ramp Metering / M. Papageorgiou, H. Hadj-Salem, J. Blosseville // *Transportation Research Record*. 1991. No 1320. P. 58–64.
13. Papageorgiou, M. Freeway Ramp Metering: an Overview / M. Papageorgiou, A. Kotsialos // *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, 2000. P. 228–239.
14. O'Brien, A. New Ramp Metering Algorithm Improves Systemwide Travel Time / A. O'Brien // *TR News*, Transportation Research Board. July–August 2000. P. 38–39.

Поступила 18.11.2014

Подписана в печать 21.01.2015

Опубликована онлайн 22.01.2016

REFERENCES

1. Mikhailov A. Yu., Golovnykh I. M. (2004) *Modern Tendencies in Designing and Reconstruction of Street and Road Networks*. Novosibirsk, Nauka. 266 p. (in Russian).
2. Lagerev R. Yu., Lagerev S. Yu., Karpov I. G. (2012) On the Problem of Transport Flow Control Under Conditions of Queuing Traffic. *Vestnik Irkutskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta* [Vestnik of Irkutsk State Technical University], 9 (68), 139–145 (in Russian).
3. Elefteriadou L., Kondyli A., Washburn S., Brilon W., Lohoff J., Jacobson L., Persaud B. (2009) Proactive Ramp Management under the Threat of Freeway-Flow Breakdown. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 16, 4–14. DOI: 10.1016/j.sbspro.2011.04.424.
4. Lorenz M. A., Elefteriadou L. (2000) Probabilistic Approach to Defining Freeway Capacity and Breakdown. *Proceedings of the 4th International Symposium on Highway Capacity*, 27 June – 1 July 2000, 84–95.
5. National Research Council (U.S.). Transportation Research Board. (2010) *Highway Capacity Manual (HCM) 2010*. Washington, DC, Transportation Research Board (TRB) of the National Academies, Vol. 1–4.
6. Vruble Yu. A., Kapsky D. V., Kot E. N. (2006) *Determination of Losses in Road Traffic*. Minsk: BNTU. 240 p. (in Russian).
7. Lertworawanich P. A., Elefteriadou L. (2003) Methodology for Estimating Capacity at Ramp Weaves Based on Gap Acceptance and Linear Optimization. *Transportation Research, Part B: Methodological*, 37 (5), 459–483. Doi: 10.1016/S0191-2615(02)00024-3.
8. Horowitz R., May A., Skabardonis A., Varaiya P., Zhang M., Gomes G. (2005) Design, Field Implementation and Evaluation of Adaptive Ramp Metering Algorithms. *California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH)*. UC Berkeley: California Partners for Advanced Transportation Technology. UCB-ITS-PRR-2006-21. Doi: escholarship.org/uc/item/5p06q6k5.
9. Makigami Y. (2001) On Ramp Control. *Concise Encyclopedia of Traffic and Transportation Systems*. Oxford: Pergamon Press, 285–289.
10. Papageorgiou M., Kotsialos A. (2002) Freeway Ramp Metering: an Overview. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 3 (4), 271–281. Doi: 10.1109/TITS.2002.806803.
11. Newman L., Dunnet A., Meirs J. (1969) *Freeway Ramp Control – What it Can and Cannot Do*. Los Angeles: California Division of Highways, District 7. 23 p.
12. Papageorgiou M., Hadj-Salem H., Blosseville J. M. (1991) ALINEA: A Local Feedback Control Law for On-Ramp Metering. *Transportation Research Record*, (1320), 58–64.
13. Papageorgiou M., Kotsialos A. (2000) Freeway Ramp Metering: an Overview. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, 228–239.
14. O'Brien A. (2000) New Ramp Metering Algorithm Improves Systemwide Travel Time. *TR News*, July–August, 38–39.

Received: 18.11.2014

Accepted: 21.01.2015

Published online: 22.01.2016

УДК 621.9.047.7

Электролитно-плазменная обработка внутренних поверхностей трубчатых изделий

Кандидаты техн. наук Ю. Г. Алексеев¹⁾, А. Ю. Королёв¹⁾,
канд. техн. наук, доц. В. С. Нисс¹⁾, инж. А. Э. Паршута¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. При производстве ряда ответственных трубчатых изделий предъявляются жесткие требования к качеству их внутренней поверхности. Известные методы обработки внутренних поверхностей труб включают в себя пескоструйную очистку, химическую очистку кислотными реагентами (щавелевая, муравьиная, сульфаминовая, ортофосфорная кислоты) и электрохимическое полирование. Недостатками химического метода являются неравномерность очистки, большой съем металла, ограниченное количество применений реагентов, сложный подбор химического состава и концентрации реагентов, сложная и экологически вредная утилизация отработанных реактивов, высокая стоимость химических реагентов. Недостатки пескоструйной очистки – низкая производительность при высоких затратах, а также вред, наносимый персоналу из-за высокой дисперсности абразивной пыли. К недостаткам электрохимического полирования относятся низкая производительность обработки, поскольку подача больших токов из-за рассеивающей способности электролита вдали от зоны основного действия электрода затруднена, ограниченная длина обрабатываемой полости из-за нагрева гибких токоподводов при рабочих плотностях тока, применение агрессивных дорогостоящих электролитов и высокие затраты на их утилизацию. Разработан новый метод полирования и очистки внутренних поверхностей трубчатых изделий на основе электролитно-плазменной обработки, обеспечивающий по сравнению с существующими методами качественную обработку с высокой интенсивностью, с применением нетоксичных, экологически безопасных и дешевых электролитов. Приведены результаты исследования влияния технологических особенностей процесса электролитно-плазменной обработки внутренних поверхностей трубчатых изделий – ширины щелевого сопла, расхода и скорости электролита – на устойчивость парогазовой оболочки, плотность тока и производительность. По итогам исследований установлены режимы, обеспечивающие стабильность и высокую производительность в процессе электролитно-плазменной обработки внутренних поверхностей трубчатых изделий.

Ключевые слова: электролитно-плазменная обработка, трубчатые изделия, полирование и очистка, внутренняя поверхность

Для цитирования: Электролитно-плазменная обработка внутренних поверхностей трубчатых изделий / Ю. Г. Алексеев [и др.] // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 1. С. 61–68

Electrolytic-Plasma Treatment of Inner Surface of Tubular Products

Yu. G. Alekseev¹⁾, A. Yu. Korolyov¹⁾, V. S. Niss¹⁾, A. E. Parshuta¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. While manufacturing a number of important tubular products stringent requirements have been imposed on quality of their inner surfaces. The well-known methods for inner surface treatment of pipes include sandblasting, chemical cleaning with acid reagents (oxalic, formic, sulfamic, orthophosphoric acids) and electrochemical polishing. Disadvantages of the chemical method are cleaning-up irregularities, high metal removal, limited number of reagent application, complicated selection of reagent chemical composition and concentration, complicated and environmentally harmful recycling of waste chemicals, high cost of reagents. Low productivity at a high cost, as well as hazardous impact on personnel due to high

Адрес для переписки

Королёв Александр Юрьевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 24,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-35-41
korolyov@metolit.by

Address for correspondence

Korolyov Aleksander Yu.
Belarusian National Technical University
24 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-35-41
korolyov@metolit.by

dispersion of abrasive dust are considered as disadvantages of sandblasting. Electrochemical polishing is characterized by the following disadvantages: low processing productivity because supply of high currents is rather difficult due to electrolyte scattering capacity away from the main electrode action zone, limited length of the cavity to be treated due to heating of flexible current leads at operating current densities, application of expensive aggressive electrolytes and high costs of their recycling. A new method for polishing and cleaning of inner surfaces of tubular products based on electrolyte-plasma treatment has been developed. In comparison with the existing methods the proposed methods ensures quality processing with high intensity while applying non-toxic, environmentally friendly and cheap electrolytes. The paper presents results of investigations on technological specific features of electrolyte-plasma treatment for inner surfaces of tubular products: influence of slotted nozzle width, electrolyte flow and rate on stability of gas-vapor blanket, current density and productivity. Results of the research have made it possible to determine modes that provide stability and high productivity in the process of electrolyte-plasma treatment of inner surfaces of tubular products.

Keywords: electrolyte-plasma treatment, tubular products, polishing and cleaning, inner surface

For citation: Alekseev Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S., Parshuta A. E. (2016) Electrolytic-Plasma Treatment of Inner Surface of Tubular Products. *Science & Technique*. 15 (1), 61–68 (in Russian)

Введение

Известные методы обработки внутренних поверхностей труб включают в себя пескоструйную очистку, химическую очистку кислотными реагентами (щавелевая, муравьиная, сульфаминовая, ортофосфорная кислоты) и электрохимическое полирование [1–3]. Недостатками химического метода являются неравномерность очистки, большой съем металла, ограниченное количество применений реагентов, сложный подбор химического состава и концентрации реагентов, сложная и экологически вредная утилизация отработанных реактивов, высокая стоимость химических реагентов. Недостатки пескоструйной очистки – низкая производительность при высоких затратах, а также вред, наносимый персоналу из-за высокой дисперсности абразивной пыли. К недостаткам электрохимического полирования относятся низкая производительность обработки, поскольку подача больших токов из-за рассеивающей способности электролита вдали от зоны основного действия электрода затруднена, ограниченная длина обрабатываемой полости из-за нагрева гибких токоподводов при рабочих плотностях тока, применение агрессивных дорогостоящих электролитов и высокие затраты на их утилизацию [4, 5].

Предложен новый метод полирования и очистки внутренних поверхностей длинномерных трубчатых изделий на основе электролитно-плазменной обработки, обеспечивающий по сравнению с существующими методами качественную обработку с высокой интенсивностью, с применением нетоксичных, экологически безопасных и дешевых электролитов.

Реализация метода становится возможной при использовании перемещаемого внутри обрабатываемой трубы электрода-инструмента, являющегося катодом. В корпусе электрода-инструмента имеется щелевое сопло, через которое электролит подается на внутреннюю поверхность трубы [6, 7]. Исследовали влияние технологических особенностей процесса электролитно-плазменной обработки внутренних поверхностей длинномерных трубчатых изделий – ширины щелевого сопла, расхода и скорости электролита – на устойчивость парогазовой оболочки, плотность тока и производительность в процессе электролитно-плазменной обработки внутренних поверхностей трубчатых изделий.

Оборудование и методы

Для выполнения исследований использовали экспериментальную установку электролитно-плазменной обработки мощностью 25 кВт. Конструкция электрода-инструмента для электролитно-плазменной обработки внутренних поверхностей трубчатых изделий представлена на рис. 1. Образцами для исследований являлись отрезки труб из стали 12X18H10T с внутренним диаметром 26,5 мм. Зазор между электродом-инструментом и внутренней стенкой трубы составлял 0,75 мм. Ширина щелевого сопла электрода-инструмента изменялась в диапазоне от 0,5 до 2,0 мм с шагом 0,5 мм. В качестве электролита использовали 6%-й раствор сульфата аммония. Температура электролита составляла 75 °С, рабочее напряжение 300 В. Силу тока определяли с помощью токовых клещей UNIT-203. Массу образцов до и после

обработки измеряли на аналитических весах Ohaus Pioneer 214-PA (дискретность 0,0001 г).



Рис. 1. Электрод-инструмент для электролитно-плазменной обработки внутренних поверхностей трубчатых изделий

Fig. 1. The electrode-tool for electrolyte-plasma treatment of the inner surfaces of tubular products

Скорость истечения электролита из электрода-инструмента рассчитывали по формуле согласно [8]

$$v = \frac{Q}{\omega}, \quad (1)$$

где Q – расход потока, $\text{м}^3/\text{с}$; ω – живое сечение, м^2 .

Расход электролита измеряли весовым методом.

Результаты исследований

Изучение влияния расхода электролита через электрод-инструмент на силу тока в цепи «электролит – анод» показало, что при любом значении ширины щелевого сопла с увеличением расхода наблюдается прямо пропорциональное увеличение силы тока (рис. 2). Причем зависимости для различных значений ширины щелевого сопла практически сливаются в одну линию и отличаются лишь величиной достигнутой силы тока.

При изменении расхода электролита и соответственно силы тока существенным образом меняется характер процесса обработки. При этом в зависимости от величины расхода отмечались две характерные стадии процесса:

1) стадия существования устойчивой парогазовой оболочки (устойчивое пленочное кипение);

2) стадия срыва парогазовой оболочки с интенсивным пузырением и разбрызгиванием электролита, характеризующаяся также импульсным повышением тока.

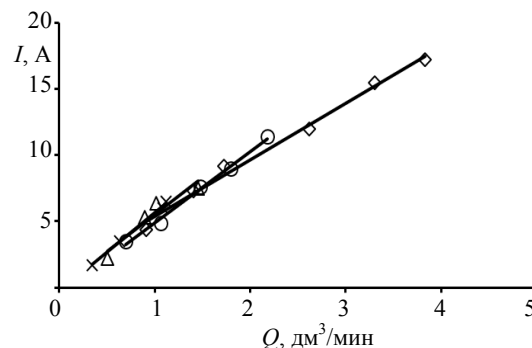


Рис. 2. Влияние расхода электролита через электрод-инструмент на силу тока в цепи «электролит – анод» при различных значениях ширины щелевого сопла δ , мм:
○ – 0,5; ◇ – 1,0; Δ – 1,5; × – 2,0

Fig. 2. Effect of flow of electrolyte through the electrode-tool on the current in “electrolyte – anode” circuit at different widths of slit nozzle δ , mm:
○ – 0,5; ◇ – 1,0; Δ – 1,5; × – 2,0

Модель гидравлической системы при обработке внутренних поверхностей трубчатых изделий представлена на рис. 3. Первой стадии соответствуют низкие значения силы тока при небольшом расходе электролита (рис. 3а). При этом зазор между обрабатываемой трубой и частью электрода-инструмента выше щелевого сопла остается свободным от электролита. Это позволяет образующейся парогазовой смеси удаляться из зоны обработки, что способствует нормальному протеканию процесса электролитно-плазменной обработки. С постепенным увеличением расхода (скорости) электролита возникает вертикальный фонтан выше щелевого сопла (рис. 3б), который уже создает некоторые трудности для свободного выхода парогазовой смеси из зоны обработки. Такому состоянию соответствует переход от первой ко второй стадии обработки. Дальнейшее увеличение расхода приводит к полному заполнению электролитом зазора между электродом-инструментом и внутренней поверхностью трубы (рис. 3с). При этом наблюдается разбрызгивание электролита и существенное импульсное повышение тока (стадия срыва парогазовой оболочки – вторая стадия процесса). Этой стадии соответствуют максимальные значения силы тока.

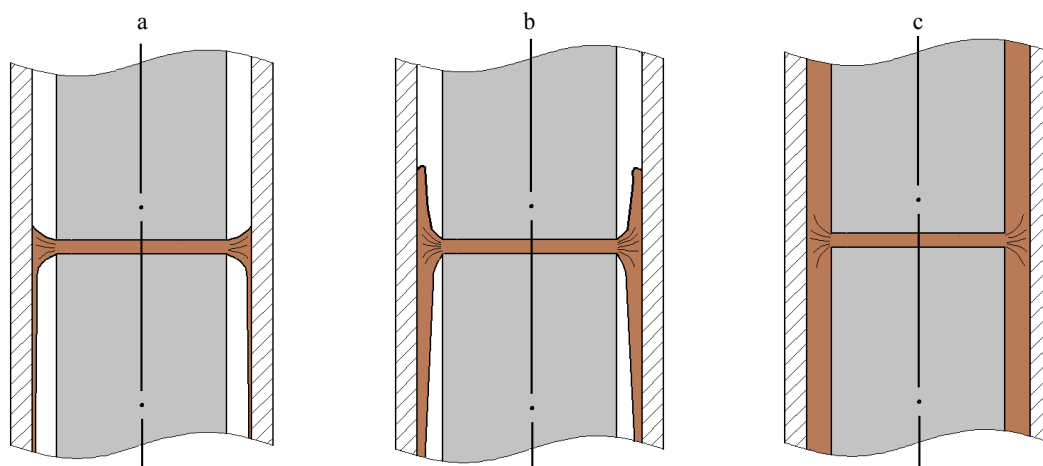


Рис. 3. Модель гидравлической системы при обработке внутренних поверхностей трубчатых изделий

Fig. 3. Model of hydraulic system for treatment of the inner surfaces of tubular products

Зависимости, характеризующие влияние скорости истечения электролита из электрода-инструмента на силу тока в цепи «электролит – анод» при различных значениях ширины щелевого сопла, представлены на рис. 4.

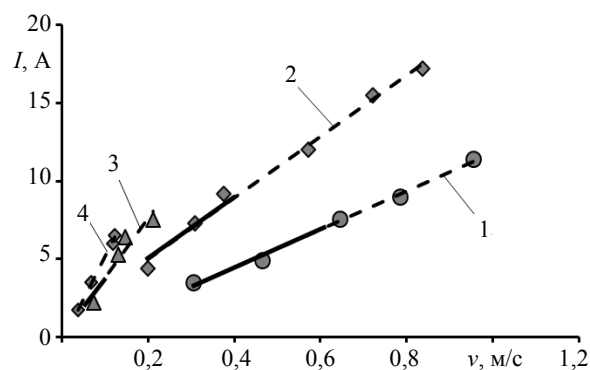


Рис. 4. Влияние скорости истечения электролита из электрода-инструмента на силу тока в цепи «электролит – анод» при различных значениях ширины щелевого сопла δ , мм: 1 – 0,5; 2 – 1,0; 3 – 1,5; 4 – 2,0

Fig. 4. Effect of flow rate of the electrolyte from the electrode-tool on the current in the “electrolyte – anode” circuit at different widths of the slit nozzle δ , mm: 1 – 0,5; 2 – 1,0; 3 – 1,5; 4 – 2,0

В отличие от зависимостей рис. 2, приведенные на рис. 4 графики позволяют наглядно оценить диапазоны параметров, обеспечивающих возможность выполнения обработки внутренних поверхностей. На рис. 4 сплошными линиями отмечены участки, соответствующие стадии существования устойчивой парогазовой оболочки, т. е. рабочий режим; штриховой ли-

нией – участки, соответствующие второй стадии (срыва парогазовой оболочки), при которой обработка затруднена. Из рис. 4 видно, что достаточно широкий рабочий диапазон скорости электролита обеспечивается при ширине щелевого сопла 0,5 и 1,0 мм. При этом максимальная сила тока достигается при $\delta = 1,0$ мм. Нормальное протекание процесса при ширине щелевого сопла 1,5 и 2,0 мм невозможно.

Для оценки влияния силы тока в цепи «электролит – анод» на производительность процесса обработки внутренних поверхностей устанавливали изменение массы образцов до и после обработки при различных значениях скорости истечения электролита из электрода-инструмента соответственно при различных значениях силы тока. Продолжительность обработки каждого образца составляла 3 мин. Поскольку при ширине щелевого сопла 1,5 и 2,0 мм не обеспечивается стабильность процесса обработки, исследования выполняли при значениях ширины 0,5 и 1,0 мм. Экспериментальные зависимости скорости массового съема от силы тока в цепи «электролит – анод» представлены на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что зависимость изменения массы образца от силы тока имеет линейный характер. Таким образом выполняется закон Фарадея [9], согласно которому объем (или масса) металла ΔV , удаленного с заготовки, прямо пропорционален (пропорциональна) электрическому заряду, прошедшему через электролит:

$$\Delta V = k_v \eta_a I t, \quad (2)$$

где k_v – объемный электрохимический эквивалент вещества (для коррозионностойких аустенитных сталей составляет $2,16 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/(\text{А} \cdot \text{мин})$); η_a – коэффициент выхода по току; I – сила тока, проходящего через электролит, А; t – продолжительность обработки, мин.

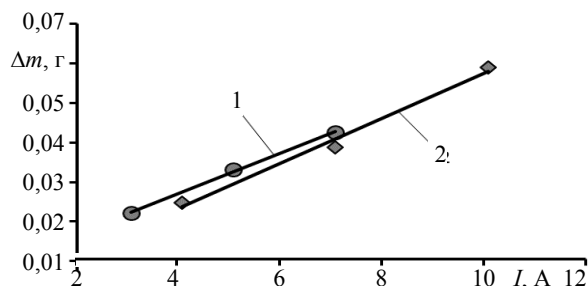


Рис. 5. Влияние силы тока в цепи «электролит – анод» на изменение массы образца в процессе обработки внутренних поверхностей: 1 – $\delta = 0,5$ мм; 2 – 1,0 мм

Fig. 5. Effect of the current in “electrolyte – anode” circuit on the mass change of the sample during treatment the inner surfaces: 1 – $\delta = 0,5$ mm; 2 – 1,0 mm

Для определения плотности тока в процессе обработки при различных значениях скорости истечения электролита из электрода-инструмента (соответственно при различных значениях силы тока) необходимо знать эффективную площадь обработки. Эффективную площадь обработки определяли по ширине зоны обработки. В качестве примера на рис. 6 представлено изображение внутренней поверхности образцов после обработки с неподвижным электродом-инструментом продолжительностью 3 мин при ширине щелевого сопла $\delta = 1,0$ мм. Цифрам соответствуют значения силы тока, при которых выполняли обработку образцов.

Из рис. 6 визуально можно установить, что ширина зоны обработки изменяется в зависимости от силы тока (скорости потока). Поскольку зона обработки имеет некоторую неравномерность по цилиндрической образующей, то для более точной количественной оценки измеряли ее ширину в десяти точках. Среднее значение по десяти точкам принимали за ширину зоны обработки.

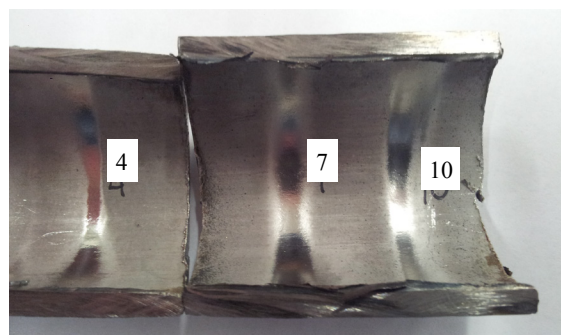


Рис. 6. Изменение ширины зоны обработки при различных значениях силы тока (скорости потока) при ширине щелевого сопла 1,0 мм

Fig. 6. Changing the width of the treatment area for different values of current (flow rate) with a width of the slit nozzle 1,0 mm

На основании полученных данных построены зависимости, характеризующие изменение ширины зоны обработки от скорости электролита (рис. 7). Видно, что зависимости имеют характерный максимум, связанный, вероятно, с гидравлическими особенностями прохождения потоков электролита в зоне обработки.

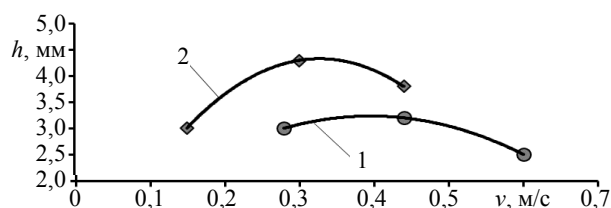


Рис. 7. Влияние скорости электролита на изменение ширины зоны обработки: 1 – $\delta = 0,5$ мм; 2 – 1,0 мм

Fig. 7. Effect of electrolyte rate on change the width of the treatment area: 1 – $\delta = 0,5$ mm; 2 – 1,0 mm

Зависимости плотности тока от скорости истечения потока электролита при различных значениях ширины щелевого сопла представлены на рис. 8. Плотность тока определяли как отношение силы тока, при которой выполнялась обработка образцов, к ширине зоны обработки. Представленные зависимости имеют параболический характер. Плотность тока повышается с увеличением скорости истечения электролита из электрода-инструмента.

Анализ зависимостей, представленных на рис. 7 и 8, показывает, что при щелевом сопле

с $\delta = 1,0$ мм обеспечивается большая по сравнению с $\delta = 0,5$ мм ширина зоны обработки. Но поскольку меньшим значениям δ соответствуют меньшие рабочие диапазоны силы тока, то для $\delta = 0,5$ и $1,0$ мм обеспечиваются примерно одинаковые значения величины плотности тока.

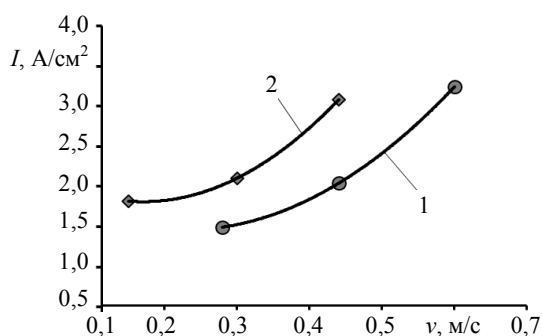


Рис. 8. Влияние скорости электролита на изменение плотности тока при обработке внутренних поверхностей: 1 – $\delta = 0,5$ мм; 2 – $1,0$ мм

Fig. 8. Effect of the electrolyte rate on change the current density in the treatment of the inner surfaces: 1 – $\delta = 0,5$ mm; 2 – $1,0$ mm

Для оценки скорости съема металла при обработке внутренних поверхностей трубчатых изделий целесообразно использовать величину массового съема с единицы поверхности за единицу времени ΔG (массовая скорость съема). Расчет массовой скорости съема проводили по полученным ранее значениям изменения массы образцов и установленной площади зоны обработки. Продолжительность обработки составляла 3 мин. Зависимости, характеризующие влияние плотности тока на изменение массовой скорости съема в процессе обработки внутренних поверхностей при ширине щелевого сопла $0,5$ и $1,0$ мм, представлены на рис. 9 (зависимости 1 и 2). Зависимости имеют линейный характер.

Для сравнения на графике рис. 9 приведена аналогичная зависимость изменения массовой скорости съема от плотности тока (зависимость 3), полученная в процессе классической электролитно-плазменной обработки наружной поверхности плоского образца при напряжении 300 В и температуре электролита от 60

до 80 °С [10]. Классическая обработка наружной поверхности в электролите с низкой температурой обеспечила достаточно высокую плотность тока – от $0,605$ до $0,305$ А/см² (рабочая температура обычно превышает 90 °С, а плотность тока $0,10$ – $0,15$ А/см²). Однако, как видно из зависимостей, даже такие значения плотности тока в разы меньше значений, достигаемых при обработке внутренних поверхностей трубчатых изделий. Соответственно и производительность процесса обработки внутренних поверхностей существенно больше производительности при классической обработке наружных поверхностей в неподвижном электролите.

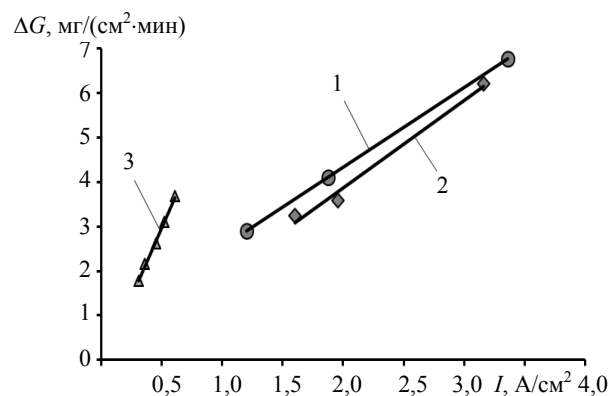


Рис. 9. Влияние плотности тока на изменение массовой скорости съема при обработке поверхностей: 1 – $\delta = 0,5$ мм; 2 – $1,0$ мм; 3 – обработка наружной поверхности плоского образца

Fig. 9. Effect of current density on the change of mass removal rate in surfaces treatment: 1 – $\delta = 0,5$ mm; 2 – $1,0$ mm; 3 – flat specimen external surface treatment

Хотя зависимость 3 также имеет линейный характер, она отличается от зависимостей 1 и 2 угловым коэффициентом. Зависимости для обработки внутренних поверхностей являются более пологими. Как показывает анализ формулы (2), причиной этого может быть только более низкий коэффициент выхода по току η_a при обработке внутренних поверхностей потоками электролита по сравнению с классической обработкой наружных поверхностей в неподвижном электролите.

Результат электролитно-плазменной обработки внутренней поверхности трубы диамет-

ром 26,5 мм из стали 12X18H10T представлен на рис. 10.

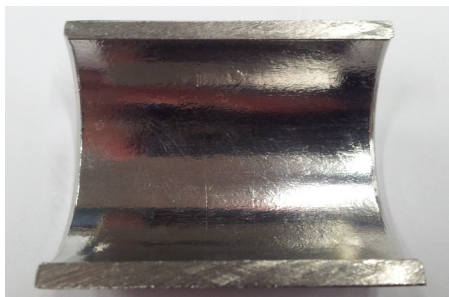


Рис. 10. Результат электролитно-плазменной обработки внутренней поверхности трубы диаметром 26,5 мм из стали 12X18H10T

Fig. 10. The result of electrolyte-plasma treatment of the inner surface of the tube with a diameter of 26,5 mm of steel 12Cr18Ni10Ti

ВЫВОДЫ

1. В процессе электролитно-плазменной обработки внутренних поверхностей трубчатых изделий при различных значениях ширины щелевого сопла в электроде-инструменте (от 0,5 до 2,0 мм) с увеличением расхода электролита наблюдается прямо пропорциональное увеличение силы тока. Установлено, что достаточно широкий рабочий диапазон скорости электролита обеспечивается при ширине щелевого сопла 0,5 и 1,0 мм. При этом максимальная сила тока 9,0 А достигается при ширине 1,0 мм. Нормальное протекание процесса при ширине щелевого сопла 1,5 и 2,0 мм невозможно из-за неустойчивости парогазовой оболочки.

2. Плотность тока и производительность электролитно-плазменной обработки внутренних поверхностей трубчатых изделий повышаются с увеличением скорости истечения электролита из электрода-инструмента. Так, при использовании электрода-инструмента с шириной щелевого сопла 1,0 мм с повышением скорости истечения электролита от 0,15 до 0,44 м/с плотность тока увеличивается с 1,60 до 3,16 А/см².

3. Разработанная технология при условии обеспечения токоподвода и подачи электролита к электроду-инструменту, перемещаемому

внутри трубы, обеспечивает возможность электролитно-плазменного полирования и очистки внутренних поверхностей трубчатых изделий большой длины (до 10 м) с различной формой профиля (круг, квадрат, прямоугольник). При этом необходимым условием является регулярность профиля трубы по всей длине.

ЛИТЕРАТУРА

1. Химические очистки теплоэнергетического оборудования / под общ. ред. Т. Х. Маргуловой. М.: Энергия, 1969. 223 с.
2. Пяндрина, Т. Н. Электрохимическая обработка металлов / Т. Н. Пяндрина. М.: Машгиз, 1961. 70 с.
3. Грилихес, С. Я. Электрохимическое и химическое полирование: теория и практика. Влияние на свойства металлов / С. Я. Грилихес. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-е, 1987. 232 с.
4. Мельников, П. С. Справочник по гальванопокрытиям в машиностроении / П. С. Мельников. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1991. 384 с.
5. Практикум по прикладной электрохимии // Н. Г. Бахчисарайцын [и др.] / под ред. В. Н. Варыпаева, В. Н. Кудрявцева. Л.: Химия, 1990. 304 с.
6. Исследование процесса полирования и очистки внутренних поверхностей длинномерных трубчатых изделий с применением электролитно-плазменной обработки / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка: сб. докл. 9-го Междунар. симпозиума, Минск, 8–10 апреля 2015 г.: в 2 ч. Минск: Беларус. навука, 2015. Ч. 2. С. 27–38.
7. Разработка процессов электролитно-плазменной обработки внутренних поверхностей длинномерных трубчатых изделий / В. С. Нисс [и др.] // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы 11-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28–30 мая 2014 г. / Нац. акад. наук Беларуси [и др.]; редкол.: А. Ф. Ильюшенко (гл. ред.) [и др.]. Минск: Беларус. навука, 2014. С. 296–297.
8. Кононов, А. А. Гидравлические и пневматические машины / А. А. Кононов, Д. Ю. Кобзов, С. М. Ермашенок. Братск: Братский гос. ун-т, 2015. 200 с.
9. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Г. Л. Амитан [и др.]; под общ. ред. В. А. Волосатова. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-е, 1988. 719 с.
10. Комбинированная технология изготовления гибких ультразвуковых концентраторов-инструментов / Ю. Г. Алексеев [и др.]; под общ. ред. Б. М. Хрусталева. Минск: БНТУ, 2015. 203 с.

Поступила 02.07.2015

Подписана в печать 25.09.2015

Опубликована онлайн 22.01.2016

REFERENCES

1. Mamet A. P., Diatlova N. M., Balezin S. A., Glikina F. B., Bulavina E. S., Shadrina N. I., Margulova T. Kh., Iakovleva V. S., Ialova A. Ia. (1969) *Chemical Cleaning of Heat Power Equipment*. Moscow, Energiya. 223 p. (in Russian).
2. Pyandrina T. N. (1961) *Electrochemical Treatment of Metals*. Moscow, Mashgiz. 70 p. (in Russian).
3. Grilikhes S. Ya. (1987) *Electrochemical and Chemical Polishing: Theory and Practice. Effect on Metal Properties*. 2nd ed. Leningrad, Mashinostroenie, Leningrad Sub-Branch. 232 p. (in Russian).
4. Melnikov P. S. (1991) *Reference Book on Electroplating in Mechanical Engineering*. 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie. 384 p. (in Russian).
5. Bakhchisaraitisian N. G., Borisoglebsky Iu. V., Burkat G. K., Varypaev V. N., Golovchanskaia R. G., Kokarev G. A., Kruglikov S. S., Nachinov G. N., Novikov V. T., Ravdel B. A., Rumiantsev E. M., Tikhonov K. I., Tiutina K. M., Tsupak T. E., Shoshina I. A. (1990) *Practical Work on Applied Electrochemistry*. 3rd ed. Moscow, Khimiya. 304 p. (in Russian).
6. Alekseev Yu. G., Korolyov A. Yu., Parshuta A. E., Niss V. S. (2015) Investigation of Polishing Process and Cleaning of Internal Surfaces of Long Tubular Products While Applying Electrolyte-Plasma Treatment. *Surface Engineering. New Powder Composite Materials. Welding: Book of Reports, 9th International Symposium, Minsk, April 8–10, 2015*. Minsk, Belaruskaya Navuka, 27–38 (in Russian).
7. Niss V. S., Alekseev Yu. G., Parshuta A. E., Korolyov A. Yu. (2014) Development of Processes for Electrolyte-Plasma Treatment of Internal Surfaces of Long Tubular Products. *New Materials and Technologies: Powder Metallurgy, Composite Materials, Protective Coatings, Welding: Proceedings of the 11th International Scientific and Technical Conference, Minsk, May 28–30, 2014*. Minsk: Belaruskaya Navuka, 296–297 (in Russian).
8. Kononov A. A., Kobzov D. Yu., Ermashonok S. M. (2015) *Hydraulic and Pneumatic Machines*. Bratsk: Bratsk State University. 200 p. (in Russian).
9. Amitan G. L., Baisupov I. A., Baron Iu. M., Bliashko Ia. I., Vagin V. A., Volosatov V. A., Kratysh G. S., Lubianitskii G. D., Nemilov E. F., Popov N. M., Pugachev S. I., Ushomirskaya L. A., Finkelshtein A. Ia., Shelestov A. M. (1988) *Reference Book on Electrochemical and Electro-Physical Treatment Methods*. Leningrad, Mashinostroenie. 719 p.
10. Alekseev Yu. G., Korolyov A. Yu., Minchenia V. T., Niss V. S., Parshuta A. E., Khroustalev B. M. (2015) *Combined Technology for Manufacturing Flexible Ultrasonic Tool-Con-Centrators*. Minsk: BNTU. 203 p.

Received: 02.07.2015

Accepted: 25.09.2015

Published online: 22.01.2016

УДК 625.08

Гидравлические агрегаты систем приводов ходового оборудования дорожно-строительных машин

Канд. техн. наук, доц. А. Я. Котлобай¹⁾, инж. А. А. Котлобай¹⁾,
канд. воен. наук, доц. В. Ф. Тамело¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Эффективность работы многофункциональных дорожно-строительных машин зависит от числа рабочих органов, одновременно выполняющих технологические операции. Системы отбора мощности силовой установки на привод ходового оборудования и активных рабочих органов дорожно-строительных машин развиваются по пути использования объемных гидравлических приводов. При проектировании гидроприводов дорожно-строительных машин актуальна проблема деления потока мощности силовой установки на привод ходового оборудования и активных рабочих органов. Ведущие компании не уделяют внимания развитию конструкций делителей потока, предпочитая выпуск более дорогих многопоточных насосов. Одним из направлений повышения эффективности многофункциональных дорожно-строительных машин является реализация гидравлической системы привода ходового оборудования на базе моноагрегатной насосной установки в составе насоса и объемного делителя потока рабочей жидкости. На основе положений дискретной гидравлики авторами разработаны принцип объемного деления и суммирования потоков рабочей жидкости, техническая реализация и методика расчета основных параметров дискретных гидрораспределителей. Приведены результаты математического моделирования гидросистем, оснащенных дискретным гидрораспределителем. Проведенный анализ работы двухмоторного гидропривода показал: дискретный гидрораспределитель обеспечивает независимость нагрузочного режима работы контура данного потребителя от нагрузочного режима контура второго потребителя в широком диапазоне изменения нагрузок; рациональным значением параметра дискретизации потока рабочей жидкости является интервал значений $k = 4-6$; максимальное значение параметров эффективности достигается при угловой скорости ротора, совпадающей с угловой скоростью вала насоса; дискретный гидрораспределитель обеспечивает возможность изменения параметров подачи рабочей жидкости по напорным магистралям потребителей в широком диапазоне за счет изменения геометрических параметров конструкции; дискретный гидрораспределитель должен устанавливаться возле насоса либо интегрироваться в его конструкцию. Разработанная математическая модель и методика определения параметров дискретного гидрораспределителя позволят оптимизировать его параметры. Применение моноагрегатной насосной установки в составе насоса и дискретного гидрораспределителя привода ходового оборудования многофункциональных дорожно-строительных машин позволит уменьшить количество насосов гидропривода, отказаться от крупногабаритного и материалоемкого раздаточного редуктора привода насосов.

Ключевые слова: многофункциональные дорожно-строительные машины, гидрообъемная трансмиссия, полноприводная машина, потоки рабочей жидкости, дискретный гидрораспределитель, математическое моделирование, двухмоторный гидропривод

Для цитирования: Котлобай, А. Я. Гидравлические агрегаты систем приводов ходового оборудования дорожно-строительных машин / А. Я. Котлобай, А. А. Котлобай, В. Ф. Тамело // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 1. С. 69–77

Hydraulic Units for Driving Systems of Running Equipment in Road Construction Machinery

A. Ja. Kotlobai¹⁾, A. A. Kotlobai¹⁾, V. F. Tamelo¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Operational efficiency of multi-functional road construction machines depends on number of working bodies which are simultaneously performing technological operations. Systems for propulsion pto to the running equipment drive and active working bodies of road construction machines are developing in the way of using three-axis hydraulic drives. When designing

Адрес для переписки

Котлобай Анатолий Яковлевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 263-50-77
ftkcdm@bntu.by

Address for correspondence

Kotlobai Anatoliy Ja.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 263-50-77
ftkcdm@bntu.by

a hydraulic system for road construction machinery dividing of power flow from propulsion to the running equipment drive and active working bodies is considered as rather essential problem. Leading companies do not pay attention to the development of flow divider designs, preferring to produce more expensive multi-flow pumps. One of the ways to increase efficiency of multi-functional road construction machinery is an implementation of running equipment hydraulic driving system based on a mono-aggregate pump unit which consists of a pump and a volumetric divider of power fluid flow. A principle of volumetric division and summing-up of power fluid flows, technical realization and methodology for calculation of key parameters of discrete flow distributors has been developed on the basis of discrete hydraulics regulations. The paper presents results of mathematical modeling of hydraulic systems equipped with the discrete flow distributor. Analysis of a dual-motor hydraulic drive operation has shown the following results: a discrete flow distributor ensures independent load mode of the current consumer circuit operation from the load mode of the second consumer circuit within a wide range of loads; rational value of working fluid flow discretization parameter is the following value interval $\kappa = 4-6$, maximum value of parameter efficiency is reached when an angular velocity of a distributor rotor coincides with the angular velocity of a pump shaft; discrete flow distributor provides a possibility to change parameters of hydraulic flow feeding in consumers' pressure lines within a wide range due to changes in geometrical parameters of the design; discrete flow distributor should be installed either close to the pump or be integrated into its design. The developed mathematical model and methodology for determination of parameters for the discrete flow distributor allow to optimize its design. Application of the mono-aggregate pump unit which consists of a pump and a discrete flow distributor of running equipment drive in multi-functional road construction machinery permits to decrease a number of hydraulic drive pumps, to withdraw from large-sized and material-intensive pump drive gear box.

Keywords: multi-functional road construction machinery, hydraulic volumetric power transmission, four-wheel drive machine, working fluid flow, discrete hydraulic flow distributor, mathematical modeling, dual-motor hydraulic drive

For citation: Kotlobai A. Ja., Kotlobai A. A., Tamelo V. F. (2016) Hydraulic Units for Driving Systems of Running Equipment in Road Construction Machinery. *Science & Technique*. 15 (1), 69–77 (in Russian)

Введение

Эффективность работы многофункциональных дорожно-строительных машин зависит от числа рабочих органов, одновременно выполняющих технологические операции. Системы отбора мощности силовой установки на привод ходового оборудования и активных рабочих органов дорожно-строительных машин развиваются по пути использования объемных гидравлических приводов. Основу современных гидрообъемных трансмиссий привода ходового оборудования многофункциональных дорожно-строительных машин составляют трансмиссии закрытого типа на базе моноблочных или раздельно-агрегатных двухмашинных гидropередач [1, 2]. Одним из направлений повышения тягово-сцепных качеств полноприводных многофункциональных дорожно-строительных машин является независимый привод мостов, достигаемый увеличением числа насосов. В пневмоколесных катках за двигателем устанавливается раздаточный редуктор, приводящий три гидронаса [3, 4], два из которых приводят во вращение гидромоторы привода колес каждого моста, а третий – гидроусилитель руля. Увеличение удельного веса механической части привода отрицательно сказывается на габаритных возможностях машины по размещению технологического оборудования. Велика трудоемкость создания механической части привода

ходового оборудования многофункциональных машин, поскольку машиностроительные предприятия, выпускающие такие машины малыми сериями, не располагают технологической базой современного уровня для изготовления конкурентоспособных систем механических приводов.

Существенным резервом рационализации гидравлических объемных многомоторных приводов является уменьшение удельного веса механических передач в кинематической цепи привода ходового оборудования [5]. Это позволит уменьшить количество насосов гидропривода, отказаться от крупногабаритного и материалоемкого раздаточного редуктора привода насосов [1]. Такая задача может решаться созданием насосного агрегата в составе однопоточного насоса и агрегата деления потока рабочей жидкости насоса.

Гидрообъемная трансмиссия привода ходового оборудования машины

Рассмотрим одно из направлений технической реализации гидрообъемной трансмиссии привода ходового оборудования полноприводной многофункциональной дорожно-строительной машины. Основу насосного моноагрегата гидрообъемной трансмиссии составляют однопоточный регулируемый аксиально-поршневой насос хода (НХ), оснащенный дискретным гидрораспределителем (ДГ) (НХ + ДГ), обеспечивающим деление и суммирование потоков ра-

бочей жидкости насоса хода, и шестеренный насос подпитки (НП) (рис. 1) [6–9]. Насосный моноагрегат (НХ + ДГ) обеспечивает питание гидромоторов с регулируемыми объемами МР1, МР2 привода мостов тяговой машины. Изменение скорости тяговой машины осуществляется варьированием производительности НХ посредством изменения угла наклона шайбы НХ. Рабочие полости гидроцилиндра управления наклонной шайбой НХ связаны с гидравлическим контуром НП и баком Б посредством гидрораспределителя управления РУН, представляющего собой трехпозиционный золотник следящего действия с обратной связью. Для оптимизации режимов работы пневмоколес переднего и заднего мостов ДГ обеспечивает одинаковую подачу рабочей жидкости по гидромоторам МР1, МР2, работая в режимах деления потока и суммирования потоков рабочей жидкости при прямом и обратном ходе. Гидропривод мостов тяговой машины выполнен по замкнутой схеме и включает контур подпитки КПП, клапан давления подпитки КДП. Всасывающая магистраль НП связана с баком Б гидросистемы.

Математическое моделирование двухмоторного гидропривода

На основе положений дискретной гидравлики [10] авторами разработан принцип объемно-

го деления и суммирования потоков рабочей жидкости, состоящий в дискретной подаче фиксированных объемов рабочей жидкости последовательно по напорным магистралям потребителей [11, 12], предложены основные технические решения дискретных гидрораспределителей роторного типа, работающих в режимах деления и суммирования потоков рабочей жидкости [13]. Для определения основных параметров дискретного гидрораспределителя рассмотрим его работу в режимах деления и суммирования потоков рабочей жидкости в двухмоторном гидроприводе (рис. 2) [14].

Переходные процессы при работе ДГ в режиме деления и суммирования потоков рабочей жидкости описываются системами дифференциальных уравнений [15], полученными на основании методик расчета [10, 16–18]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp_n}{dt} &= \frac{Q_n - \sum_{i=1}^2 Q_{di}}{\psi V_{гн}}; \\ \frac{dp_i}{dt} &= \frac{Q_{di} - F_i \frac{dz_i}{dt}}{\psi (F_i z_i + f l_i)} - \frac{\rho l_i}{f} \frac{d^2 Q_{di}}{dt^2} - \frac{8 \pi \rho v l_i}{f^2} \frac{d Q_{di}}{dt}; \\ \frac{d^2 z_i}{dt^2} &= \frac{1}{m_i} \left(F_i p_i - P_i - k_{\pi} \frac{dz_i}{dt} - P_{тр} \operatorname{sgn} \frac{dz_i}{dt} \right); \end{aligned} \right\} (1)$$

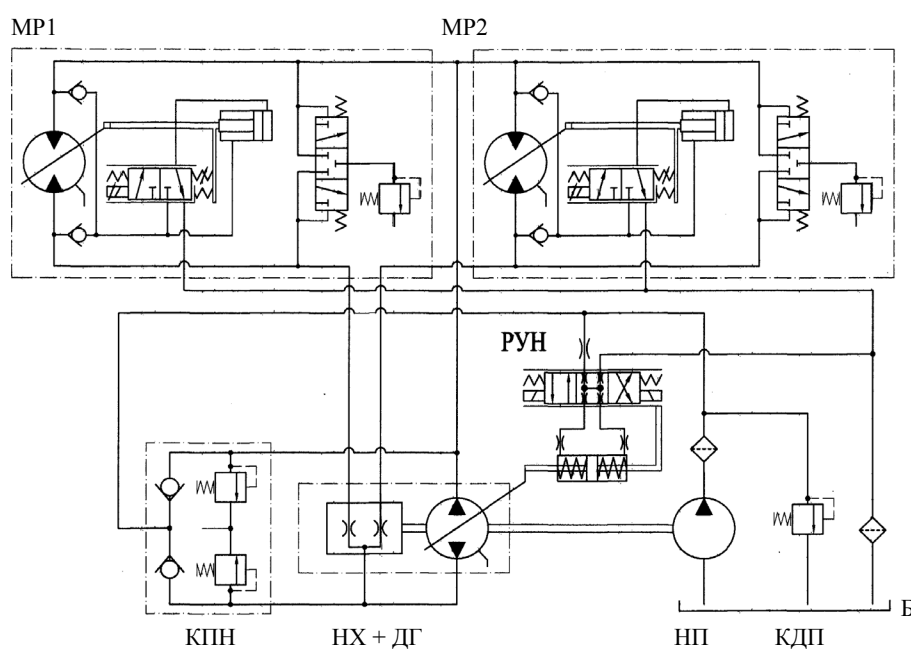


Рис. 1. Принципиальная схема гидропривода ходового оборудования полноприводной машины

Fig. 1. Basic diagram of hydraulic volumetric transmission for all-wheel driven construction machine

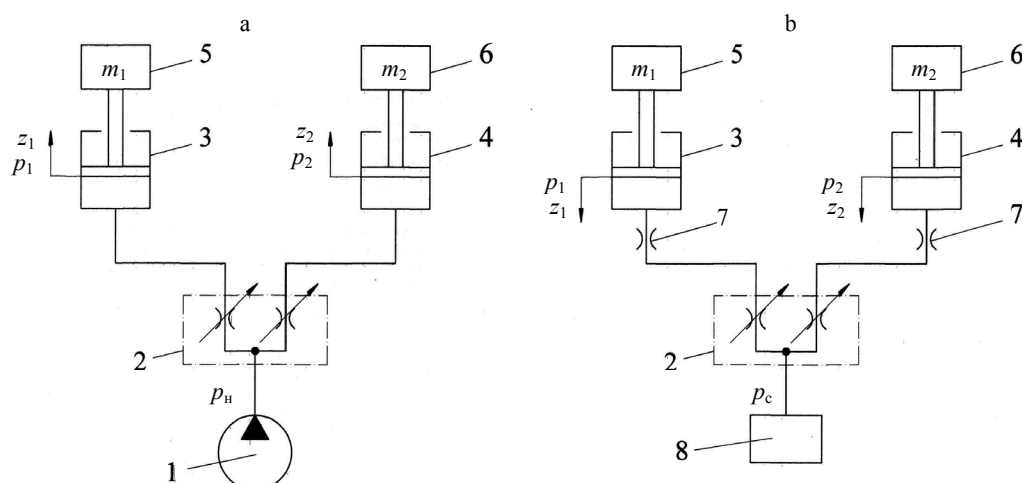


Рис. 2. Динамическая схема двухмоторного гидропривода при работе дискретного гидрораспределителя в режиме: а – деления потоков рабочей жидкости; б – суммирования потоков рабочей жидкости; 1 – насос; 2 – дискретный гидрораспределитель; 3, 4 – исполнительный гидроцилиндр; 5, 6 – груз; 7 – нагрузочный дроссель; 8 – потребитель

Fig. 2. Analytical model for dual actuator hydraulic system with discrete distributor working as: a – flow divider; b – flow summing; 1 – pump; 2 – discrete distributor; 3, 4 – actuators; 5, 6 – working loads; 7 – throttle load; 8 – consumer or tank

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp_i}{dt} &= \frac{F_i \frac{dz_i}{dt} - Q_{ni}}{\psi(V_i - F_i z_i + f'_i)}; \\ \frac{dp_{ni}}{dt} &= \frac{Q_{ni} - Q_{di}}{\psi(V_{gni} + f'_{ni})}; \\ \frac{d^2 z_i}{dt^2} &= \frac{1}{m_i} \left(P_i - p_i F_i - k_{\text{ц}} \frac{dz_i}{dt} - P_{\text{три}} \operatorname{sgn} \frac{dz_i}{dt} \right), \end{aligned} \right\} (2)$$

где z_i – координата поршня исполнительного цилиндра 3, 4; F_i – площадь поршня исполнительного гидроцилиндра 3, 4; m_i – масса груза 5, 6 и подвижных частей, приведенная к поршню; $P_{\text{три}}$ – сила трения; P_i – то же сопротивление подъему груза 5, 6; p_n, p_i – давление в полости насоса 1, исполнительного гидроцилиндра 3, 4; p_c, p_{ni} – давление в магистрали потребителя 8 и после нагрузочного дросселя 7; Q_{ni} – расход рабочей жидкости через нагрузочный дроссель 7; l'_i – длина гидролиний от исполнительного гидроцилиндра 3, 4 до нагрузочного дросселя 7; Q_n – объемная подача насоса 1; Q_{di} – подача рабочей жидкости в напорную магистраль i -го исполнительного гидроцилиндра 3, 4; ψ – коэффициент податливости рабочей жидкости; $V_{\text{гн}}, l_n$ – объем гидравлического гасителя в цепи насоса 1 и длина трубопроводов, соединяющих насос 1 с гидравлическим гасителем и ДГ; $V_{\text{гни}}, l_{ni}$ – объем полости гидравлического гасителя в гидролинии

и длина трубопровода от нагрузочного дросселя 7 до ДГ; $V_i = F_i z_{i\text{max}}$ – объем поршневой полости исполнительного гидроцилиндра 3, 4 в исходном положении; f – площадь проходного сечения всех гидролиний; l_i – длина трубопровода от ДГ до исполнительного гидроцилиндра 3, 4; ρ – плотность рабочей жидкости; $k_{\text{ц}}$ – коэффициент трения; ν – кинематический коэффициент вязкости.

Эффективность работы ДГ оценивается по величине гидравлического КПД_{га} аппаратов $\bar{\eta}_{\text{га}}$ [10], учитывающего потери мощности при течении рабочей жидкости через ДГ, и параметра k_{z2} , учитывающего рассогласования перемещения поршней исполнительных гидроцилиндров.

Параметры, определяющие работу многомоторного гидропривода: режим нагружения многомоторного гидропривода; дискретизация потока рабочей жидкости ДГ; соотношение геометрических параметров рабочих камер ДГ; объемы гидравлических полостей на участках «насос – дискретный гидрораспределитель» (деление потока рабочей жидкости) и «нагрузочный дроссель – дискретный гидрораспределитель» (суммирование потоков рабочей жидкости). Математическое моделирование двухмоторного гидропривода с ДГ, работающим в режиме деления потока рабочей жидкости, проводили для условий работы: насос 310.4.56

с подачей $Q = 1330 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ работает с двумя гидроцилиндрами с диаметрами поршней 0,12 м с нагрузкой, задаваемой параметром $k_{\text{нд}} = P_1/P_2$, изменяющимся в пределах 0,125–1,00 при нагрузке $P_2 = 200 \text{ кН}$. При расчете принимали числовые значения параметров: $f = 3,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}$; $\psi = 1,5 \cdot 10^{-9}$; $P_{\text{тр}i} = 0,1P_i$; $k_{\text{ц}} = 0,15$; $\zeta = 0,5$. Математическое моделирование двухмоторного гидропривода с ДГ, работающим в режиме суммирования потоков рабочей жидкости, проводили для условий работы: два гидроцилиндра с диаметрами порш-

- деления потока рабочей жидкости насоса (рис. 2а):

$$\left. \begin{aligned} \bar{\eta}_{\text{га}} &= 0,996 + 0,036k_{\text{нд}} + 0,005\kappa - 0,014k_{\text{нд}}^2 - 0,001k_{\text{нд}}\kappa; \\ k_{z2} &= 0,915 + 0,121k_{\text{нд}} - 0,063\kappa - 0,017k_{\text{нд}}^2 + 0,556k_{\text{нд}}\kappa; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{\eta}_{\text{га}} &= 1,197 - 0,028k_{\text{нд}} - 0,284k_{Q2} - 0,094k_{\text{нд}}^2 + 0,034k_{Q2}^2 + 0,169k_{\text{нд}}k_{Q2}; \\ k_{z2} &= 0,292 - 0,237k_{\text{нд}} + 0,372k_{Q2} + 0,353k_{\text{нд}}^2 - 0,032k_{Q2}^2 + 0,303k_{\text{нд}}k_{Q2}; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{\eta}_{\text{га}} &= 0,901 + 0,162k_{\text{нд}} + 0,268 \cdot 10^{-3}\omega - 0,091k_{\text{нд}}^2 - 0,291 \cdot 10^{-6}\omega^2 - 0,116 \cdot 10^{-3}k_{\text{нд}}\omega; \\ k_{z2} &= 0,876 + 0,361k_{\text{нд}} - 0,002\omega - 0,199k_{\text{нд}}^2 + 0,144 \cdot 10^{-5}\omega^2 + 0,002k_{\text{нд}}\omega; \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{\eta}_{\text{га}} &= 0,982 + 0,024k_{\text{нд}} - 30,23V_{\text{гн}} - 0,012k_{\text{нд}}^2 + 21,42k_{\text{нд}}V_{\text{гн}}; \\ k_{z2} &= 0,791 - 0,062k_{\text{нд}} - 4266V_{\text{гн}} + 0,433k_{\text{нд}}^2 + 3811 \cdot 10^3V_{\text{гн}}^2 + 2715k_{\text{нд}}V_{\text{гн}}; \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

- суммирования потоков рабочей жидкости из полостей исполнительных гидроцилиндров (рис. 2б):

$$\left. \begin{aligned} \bar{\eta}_{\text{га}} &= 0,149 - 0,128k_{\text{нс}} + 12,04k_{\text{с}} - 0,125k_{\text{нс}}^2 - 40,4k_{\text{с}}^2 + 0,735k_{\text{нс}}k_{\text{с}}; \\ k_{z2} &= 0,19 + 1,53k_{\text{нс}} - 2,259k_{\text{с}} - 0,816k_{\text{нс}}^2 - 6,0k_{\text{с}}^2 + 3,749k_{\text{нс}}k_{\text{с}}; \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{\eta}_{\text{га}} &= 0,859 - 0,231k_{Q2} + 0,304k_{\text{нс}} + 0,02k_{Q2}^2 - 0,416k_{\text{нс}}^2 + 0,076k_{Q2}k_{\text{нс}}; \\ k_{z2} &= 0,26 - 0,337k_{Q2} + 2,334k_{\text{нс}} + 0,0478k_{Q2}^2 - 0,026k_{\text{нс}}^2 + 0,679k_{Q2}k_{\text{нс}}; \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{\eta}_{\text{га}} &= 0,86 - 1,297k_f - 0,016k_{\text{нс}} + 0,749k_f^2 - 0,139k_{\text{нс}}^2 + 0,12k_fk_{\text{нс}}; \\ k_{z2} &= -0,079 + 0,009k_f + 2,124k_{\text{нс}} - 0,03k_f^2 - 1,124k_{\text{нс}}^2 + 0,06k_fk_{\text{нс}}; \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{\eta}_{\text{га}} &= 0,656 + 0,625V_{\text{гн}i} - 0,474k_{\text{нс}} - 0,005V_{\text{гн}i}^2 + 0,056k_{\text{нс}}^2 + 0,398V_{\text{гн}i}k_{\text{нс}}; \\ k_{z2} &= -0,097 + 13,69V_{\text{гн}i} + 1,957k_{\text{нс}} - 0,913k_{\text{нс}}^2 - 7,476V_{\text{гн}i}k_{\text{нс}}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где $k_{\text{нд}} = P_1/P_2$, $k_{\text{нс}} = P_2/P_1$, $k_{\text{с}} = p_{\text{с}}/p_2$ – параметры нагружения рабочих магистралей ДГ в режиме деления и суммирования потоков рабочей жидкости; $p_{\text{с}}, p_2$ – давление в магистрале потребителя и исполнительного гидроцилиндра 4 (рис. 2б); κ – параметр дискретизации потока рабочей жидкости; k_{Q2} – то же, определяющий соотношение геометрических размеров рабочих камер ДГ; ω – угловая скорость вращения ротора ДГ; $k_f = f_{\text{д}}/f$ – коэффициент площади проходного сечения нагрузочного дросселя 7 (рис. 2б); $f_{\text{д}}$ – площадь проходного сечения нагрузочного дросселя 7.

Анализ уравнений регрессии (3) показал, что ДГ обеспечивает независимость нагрузочного режима работы контура данного потребителя от нагрузочного режима контура второго потребителя в широком диапазоне изменения нагрузок. Максимальное значение КПД_{га} достигается при равенстве нагрузок напорных магистралей потребителей (рис. 3) и увеличивается с повышением параметра κ , что объясняется уменьшением дискретного объема рабочей жидкости, поступающей в напорную магистраль потребителя при каждом цикле работы ДГ, и снижением динамичности работы гидропривода. Следует отметить, что наиболее существенно КПД_{га} повышается при увеличении параметра κ с 1 до 3. При дальнейшем росте κ величина КПД_{га} изменяется незначительно.

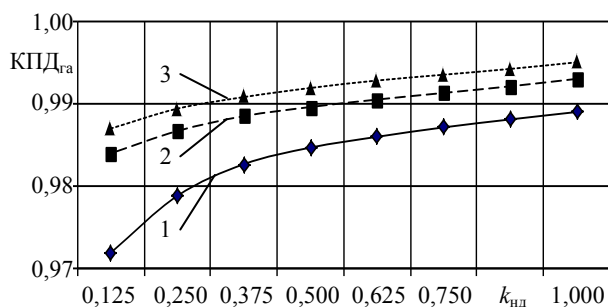


Рис. 3. Зависимость КПД_{га} от параметров нагружения $k_{нд}$ и дискретизации κ потока рабочей жидкости: 1 – $\kappa = 3$; 2 – 6; 3 – 9

Fig. 3. Dependence of efficiency coefficient on loading parameters $k_{нд}$ and discretization factor κ of working fluid flow: 1 – $\kappa = 3$; 2 – 6; 3 – 9

Уменьшение параметра $k_{нд}$ и увеличение κ приводят к пропорциональному снижению k_{z2} . На основании полученных результатов можно считать рациональным интервал значений параметра $\kappa = 4-6$, обеспечивающий высокое значение КПД_{га} и относительно небольшое снижение k_{z2} при изменении нагрузок напорных магистралей потребителей в широком диапазоне.

Анализ работы многомоторного гидропривода (4) при синхронизации работы исполнительных гидроцилиндров ($k_{z2} = 1$) показывает, что диапазон изменения k_{Q2} и КПД_{га} при уменьшении параметра нагружения $k_{нд}$ испол-

нительных гидроцилиндров снижается при уменьшении κ (рис. 4).

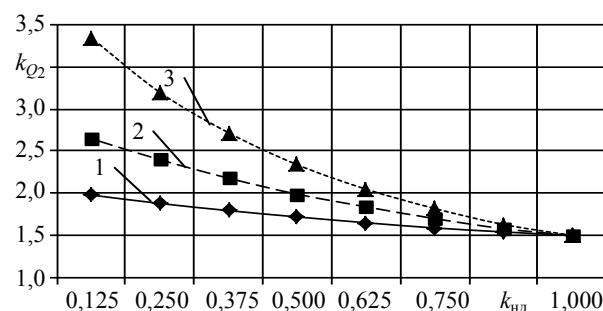


Рис. 4. Зависимость k_{Q2} от параметров нагружения $k_{нд}$ и дискретизации κ потока рабочей жидкости: 1 – $\kappa = 3$; 2 – 6; 3 – 9

Fig. 4. Diagram showing the the division precision parameter k_{Q2} depending from the loading parameter $k_{нд}$ and the flow discretisation factor κ : 1 – $\kappa = 3$; 2 – 6; 3 – 9

Конструктивную схему ДГ, обеспечивающего синхронизацию работы исполнительных гидроцилиндров, следует формировать со значениями $\kappa = 3-4$, обеспечивающими минимальное снижение КПД_{га} при изменении параметра нагружения $k_{нд}$ в широком диапазоне. При увеличении ω КПД_{га} повышается благодаря снижению динамичности работы гидропривода (5), а параметр k_{z2} уменьшается. Максимальное значение КПД_{га} достигается при $\omega = 188,4-314,0$ рад/с, что соответствует рабочему диапазону угловых скоростей вращения вала насоса.

При увеличении объема $V_{гн}$ параметр k_{z2} уменьшается (6). Рост объема $V_{гн}$ способствует появлению дифференциального эффекта. Рациональные значения k_{z2} достигаются при $V_{гн} = (0,5-1,0)q$ (здесь q – рабочий объем насоса), что эквивалентно длине рукава высокого давления $l_i = 0,07-0,14$ м. КПД_{га} имеет максимальное значение при $V_{гн} = (0,5-1,0)q$ и снижается при увеличении объема $V_{гн}$. Дискретный гидрораспределитель должен устанавливаться рядом с насосом либо интегрироваться в его конструкцию. Моделирование показало, что изменение величин fl_i не влияет на параметры КПД_{га} и k_{z2} .

При работе в режиме суммирования потоков рабочей жидкости ДГ обеспечивает независимость нагрузочных режимов работы контуров при широком диапазоне изменения нагрузок (7).

Анализ работы гидропривода показал, что, изменяя параметр k_{Q2} , можно обеспечить заданное рассогласование перемещения грузов (8). При увеличении k_{Q2} величина КПД_{га} уменьшается, достигая минимального значения при $k_{Q2} = 4-5$, что объясняется повышением динамичности нагружения гидропривода.

При увеличении проходного сечения нагрузочного дросселя 7, определяемого параметром k_f , КПД_{га} уменьшается (9). Параметр k_{z2} изменяется незначительно. При формировании многомоторных приводов следует использовать нагрузочные дроссели 7 малого проходного сечения.

Увеличение объема гидравлического гасителя $V_{гн1}$, $V_{гн2}$ в магистрали от ДГ до нагрузочного дросселя 7 приводит к существенному увеличению КПД_{га} и незначительному повышению k_{z2} (10). Полученный результат позволяет сделать вывод: удаление ДГ от нагрузочных дросселей 7 позволяет улучшить показатели работы многомоторного гидропривода.

Проведенный анализ работы двухмоторного гидропривода, оснащенного ДГ, работающим в режиме деления и суммирования потоков рабочей жидкости, показал:

- ДГ обеспечивает независимость нагрузочного режима работы контура данного потребителя от нагрузочного режима контура второго потребителя в широком диапазоне изменения нагрузок;

- рациональным значением параметра дискретизации потока рабочей жидкости является интервал значений $\kappa = 4-6$;

- ДГ должен устанавливаться возле насоса либо интегрироваться в его конструкцию;

- максимальное значение параметров эффективности КПД_{га} и k_{z2} достигается при угловой скорости ротора, совпадающей с угловой скоростью вала насоса;

- ДГ обеспечивает возможность изменения параметров подачи рабочей жидкости по напорным магистралям потребителей в широком диапазоне за счет изменения геометрических характеристик.

Конструктивно ДГ может быть реализован в виде отдельного агрегата, устанавливаемого на корпус насоса с приводом ротора ДГ от приводного вала насоса [19] на фланец насоса в качестве промежуточного агрегата между механизмом привода и насосом серийного исполнения [20], либо интегрироваться в конструкцию насоса [21, 22] с доработкой существующей схемы.

ВЫВОДЫ

1. Разработка и применение моноагрегатной насосной установки в составе насоса и дискретного гидрораспределителя привода ходового оборудования многофункциональных дорожно-строительных машин позволят уменьшить количество насосов гидропривода, отказаться от крупногабаритного и материалоемкого раздаточного редуктора привода насосов.

2. На основании математического моделирования определены рациональные параметры дискретного гидрораспределителя гидрообъемных трансмиссий многофункциональных дорожно-строительных машин. Разработка и внедрение гаммы дискретных гидрораспределителей позволят расширить элементную базу систем современного гидропривода ходового оборудования дорожно-строительных машин, снизить ее материалоемкость и затраты на разработку и производство дорожно-строительных машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петров, В. А. Гидрообъемные трансмиссии самоходных машин / В. А. Петров. М.: Машиностроение, 1988. 248 с.
2. Гидропневмоавтоматика и гидропривод мобильных машин. Объемные гидро- и пневмомашин и передачи / А. Ф. Андреев [и др.]; под ред. В. В. Гуськова. Минск: Вышэйш. шк., 1987. 310 с.
3. Строительные машины: в 2 т. / А. В. Раннев [и др.]; под общ. ред. Э. Н. Кузина. 5-е изд., перераб. М.: Машиностроение, 1991. Т. 1: Машины для строитель-

- ва промышленных, гражданских сооружений и дорог. 496 с.
4. Раннев, А. В. Устройство и эксплуатация дорожно-строительных машин / А. В. Раннев, М. Д. Полосин. 2-е изд., стер. М.: Изд. центр «Академия», 2003. 488 с.
 5. Леонович, И. И. Насосные установки многомоторных приводов технологических машин / И. И. Леонович, А. Я. Котлобай, А. А. Котлобай // Вестник Белорусского национального технического университета. 2005. № 6. С. 36–39.
 6. Гидрообъемная трансмиссия тяговой машины: пат. 64724 Рос. Федерации: МПК F16H 61/44, F15B 11/22 / В. А. Коробкин, А. Я. Котлобай, А. Н. Ивановский, Ю. А. Андрияненко, Б. А. Луцков, А. А. Котлобай; дата публ.: 10.07.2007.
 7. Гидрообъемная трансмиссия технологической машины: пат. 70326 Рос. Федерации: МПК F15B 11/22 / В. А. Коробкин, А. Я. Котлобай, А. Н. Ивановский, Ю. А. Андрияненко, Б. А. Луцков, А. А. Котлобай; дата публ.: 20.01.2008.
 8. Гидрообъемная трансмиссия технологической машины: пат. 81543 Рос. Федерации: МПК F16H 61/44 / В. А. Коробкин, А. Я. Котлобай, А. Н. Ивановский, Ю. А. Андрияненко, Б. А. Луцков, А. А. Котлобай; дата публ.: 20.03.2009.
 9. Гидрообъемная трансмиссия тяговой машины: пат. 7510 Респ. Беларусь; МПК F 16H 61/44, F15B 11/22 (2006.01) / А. Я. Котлобай, А. А. Котлобай, А. Ю. Мазур; дата публ.: 30.08.2011.
 10. Навроцкий, К. Л. Теория и проектирование гидро- и пневмоприводов / К. Л. Навроцкий. М.: Машиностроение, 1991. 384 с.
 11. Коробкин, В. А. Агрегаты дискретного действия гидроприводов строительных и дорожных машин / В. А. Коробкин, А. Я. Котлобай, А. А. Котлобай // Строительные и дорожные машины. 2010. № 5. С. 43–46.
 12. Моделирование дискретного гидрораспределителя гидропривода строительных и дорожных машин / А. В. Бусел [и др.] // Новости науки и технологий. 2014. № 2. С. 22–30.
 13. Модульная дозирующая система: пат. 63880 Рос. Федерации: МПК F15B 11/22 / В. А. Коробкин, А. Я. Котлобай, А. Н. Ивановский, Ю. А. Андрияненко, Б. А. Луцков, А. А. Котлобай; дата публ.: 10.06.2007.
 14. Богданович, Л. Б. Гидравлические приводы / Л. Б. Богданович. Киев: Вища шк., Головное изд-во, 1980. 232 с.
 15. О перспективных направлениях создания гидравлических агрегатов приводов строительных и дорожных машин / В. А. Коробкин [и др.] // Наука и техника. 2012. № 6. С. 71–76.
 16. Метлюк, Н. Ф. Динамика пневматических и гидравлических приводов автомобилей / Н. Ф. Метлюк, В. П. Автушко. М.: Машиностроение, 1980. 231 с.
 17. Попов, Д. Н. Механика гидро- и пневмоприводов / Д. Н. Попов. М.: Изд-во МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2001. 320 с.
 18. Башта, Т. М. Гидропривод и гидропневмоавтоматика / Т. М. Башта. М.: Машиностроение, 1972. 320 с.
 19. Насос шестеренный: пат. 2772 Респ. Беларусь; F15B 11/22, E04C 2/04 / В. А. Коробкин, А. Я. Котлобай, А. А. Котлобай; дата публ. 30.06.06.
 20. Гидронавесная система технологической машины: пат. 72029 Рос. Федерации; МПК F16H 61/44 / В. А. Коробкин, А. Я. Котлобай, Ю. А. Андрияненко, Б. А. Луцков, А. А. Котлобай; дата публ. 27.03.08.
 21. Насос шестеренный: пат. 66449 Рос. Федерации; МПК F15B 11/22 / В. А. Коробкин, А. Я. Котлобай, А. Н. Ивановский, Ю. А. Андрияненко, Б. А. Луцков, А. А. Котлобай; дата публ. 10.09.2007.
 22. Аксиально-поршневая гидромашина: пат. 66448 Рос. Федерации; МПК F15B 11/22 / В. А. Коробкин, А. Я. Котлобай, А. Н. Ивановский, Ю. А. Андрияненко, Б. А. Луцков, А. А. Котлобай; дата публ. 10.09.2007.

Поступила 09.04.2015

Подписана в печать 12.06.2015

Опубликована онлайн 22.01.2016

REFERENCES

1. Petrov V. A. (1988) *Hydrostatic Transmission of Self-Propelled Vehicles*. Moscow, Mashinostroenie. 248 p. (in Russian).
2. Andreev A. F., Bartashevich L. V., Bogdan N. V., Korolkevich A. V., Mamonov M. I., Romanchik E. A., Sabadakh B. V., Guskov V. V. (1987) *Hydraulic and Pneumatic Control Systems and Hydraulic Drive of Mobile Machines. Three-Axis Hydro- and Pneumatic Machines and Gearings*. Minsk, Vysheyschaya Shkola. 310 p. (in Russian).
3. Rannev A. V., Korelin V. F., Zhavoronkov A. V., Shloido G. A., Makushkin D. O., Timofeev V. A., Telushkin A. V., Erofeev L. V., Viazovikin V. N., Zaitsev L. V., Nevzorov L. A., Kuzin E. N. (1991) *Construction Machinery. Reference Book. Vol. 1. Machinery for Construction of Industrial, Civil Structures and Roads*. 5th ed. Moscow, Mashinostroenie. 496 p. (in Russian).
4. Rannev A. V., Polosin M. D. (2003) *Arrangement and Operation of Road-Construction Machinery*. 2nd ed. Moscow, Publishing Centre "Akademika". 488 p. (in Russian).
5. Leonovich I. I., Kotlobai A. Ja., Kotlobai A. A. (2005) Pump Units for Multi-Motor Drives of Technological Machinery. *Vestnik BNTU [Bulletin of the Belarusian National Technical University]*, (6), 36–39. (in Russian).
6. Korobkin V. A., Kotlobai A. Ja., Ivanovsky A. N., Andriyenko Yu. A., Lutskov B. A., Kotlobai A. A. (2007) *Hydrostatic Transmission of Traction Machine*. Patent Russian Federation, No 64724. (in Russian).
7. Korobkin V. A., Kotlobai A. Ja., Ivanovsky A. N., Andriyenko Yu. A., Lutskov B. A., Kotlobai A. A. (2008) *Hydrostatic Transmission of Technological Machine*. Patent Russian Federation No 70326 (in Russian).
8. Korobkin V. A., Kotlobai A. Ja., Ivanovsky A. N., Andriyenko Yu. A., Lutskov B. A., Kotlobai A. A. (2009) *Hydrostatic Transmission of Technological Machine*. Patent Russian Federation No 81543.

9. Kotlobai A. Ja., Kotlobai A. A., Mazur A. Yu. (2011) *Hydrostatic Transmission of Traction Machine*. Patent Republic of Belarus No 7510 (in Russian).
10. Navrotsky K. L. (1991) *Theory and Designing of Hydro- and Pneumatic Drives*. Moscow, Mashinostroenie. 384 p. (in Russian).
11. Korobkin V. A., Kotlobai A. Ja., Kotlobai A. A. (2010) Sampling Action Plants of Hydraulic Drives for Construction and Road Machinery. *Stroitelnye i Dorozhnye Mashiny [Construction and Road Machinery]*, (5), 43–46 (in Russian).
12. Busel A. V., Kotlobai A. Ja., Kotlobai A. A., Tamelo V. F. (2014) Simulation of Digital Hydraulic Distributor of Hydraulic Drive for Construction and Road Machinery. *Novosti Nauki i Tekhnologii [News of Science and Technology]*, (2), 22–30 (in Russian).
13. Korobkin V. A., Kotlobai A. Ja., Ivanovsky A. N., Andriyanenko Yu. A., Lutskov B. A., Kotlobai A. A. (2007) *Module Metering System*. Patent Russian Federation No 63880 (in Russian).
14. Bogdanovich L. B. (1980) *Hydraulic Drives*. Kiev, Vyssha Shkola. 232 p. (in Russian).
15. Korobkin V. A., Kotlobai A. Ja., Kotlobai A. A., Tamelo V. F. (2012) On Prospective Directions for Creation of Hydraulic Drive Units for Construction and Road Machinery. *Nauka i Tekhnika [Science and Technique]*, (6), 71–76 (in Russian).
16. Metliouk N. F., Aytushko V. P. (1980) *Dynamics of Pneumatic and Hydraulic Automotive Drives*. Moscow, Mashinostroenie. 231 p. (in Russian).
17. Popov D. N. (2001) *Mechanics of Hydro- and Pneumatic Drives*. Moscow: Publishing House of Moscow State Technical University Named after N. E. Bauman. 320 p. (in Russian).
18. Bashta T. M. (1972) *Hydraulic Drive and Hydraulic and Pneumatic Control Systems*. Moscow, Mashinostroenie. 320 p. (in Russian).
19. Korobkin V. A., Kotlobai A. Ja., Kotlobai A. A. (2006) *Gear Pump*. Patent Republic of Belarus No 2772 (in Russian).
20. Korobkin V. A., Kotlobai A. Ja., Ivanovsky A. N., Andriyanenko Yu. A., Lutskov B. A., Kotlobai A. A. (2008) *Hydraulic Mounted System of Technological Machine*. Patent Russian Federation No 72029 (in Russian).
21. Korobkin V. A., Kotlobai A. Ja., Ivanovsky A. N., Andriyanenko Yu. A., Lutskov B. A., Kotlobai A. A. (2007) *Gear Pump*. Patent Russian Federation No 66449 (in Russian).
22. Korobkin V. A., Kotlobai A. Ja., Ivanovsky A. N., Andriyanenko Yu. A., Lutskov B. A., Kotlobai A. A. (2007) *Axial Piston Hydraulic Machine*. Patent Russian Federation No 66448 (in Russian).

Received: 09.04.2015

Accepted: 12.06.2015

Published online: 22.01.2016

УДК 656.025.510.223

Энтропийные характеристики в моделях согласования смежных участков дорог

Асп. Н. И. Кульбашная¹⁾

¹⁾Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова (Харьков, Республика Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Рассмотрено применение энтропийных характеристик в качестве критериев по согласованию условий на смежных участках дорог. Доведено, что энтропийные характеристики нашли широкое применение в методах, учитывающих информационное воздействие среды на водителей, и в механизмах по созданию таких условий движения, которые обеспечивали бы сохранение оптимального уровня эмоциональной напряженности водителя при движении по дороге. Решение такой задачи рассматривается в аспекте согласования условий движения на смежных участках дорог, что в свою очередь направлено на исключение возникновения переходных процессов у водителя. За основу разработки методики согласования условий движения на смежных участках дорог принята концепция Э. В. Гаврилова по согласованию определенных параметров участков, которые могут быть выражены через энтропийные характеристики. Предлагается выбор критериев согласования производить в зависимости от показателей аварийности, ввиду того что движение по смежным участкам, где условия резко изменяются, может привести к созданию аварийной ситуации. В качестве энтропийных характеристик выбраны относительные организации поля восприятия водителя и взаимодействия водителя со средой движения. Поэтому в статье данные показатели поставлены в зависимость от коэффициента происшествий. Результаты исследований показали наличие сильной корреляционной связи относительной организации поля восприятия водителя и относительной организации взаимодействия водителя со средой движения от коэффициента происшествий. Также результаты проведенного эксперимента подтвердили влияние коэффициента происшествий на исследуемые энтропийные характеристики.

Ключевые слова: энтропийные характеристики, коэффициент происшествий, дорожная среда, согласование, смежный участок, относительная организация взаимодействия

Для цитирования: Кульбашная, Н. И. Энтропийные характеристики в моделях согласования смежных участков дорог / Н. И. Кульбашная // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 1. С. 78–84

Entropy Characteristics in Models for Coordination of Neighboring Road Sections

N. I. Kulbashnaya¹⁾

¹⁾O. M. Beketov National University of Urban Economy (Kharkov, Republic of Ukraine)

Abstract. The paper considers an application of entropy characteristics as criteria to coordinate traffic conditions at neighboring road sections. It has been proved that the entropy characteristics are widely used in the methods that take into account information influence of the environment on drivers and in the mechanisms that create such traffic conditions which ensure preservation of the optimal level of driver's emotional tension during the drive. Solution of such problem is considered in the aspect of coordination of traffic conditions at neighboring road sections that, in its turn, is directed on exclusion of any driver's transitional processes. Methodology for coordination of traffic conditions at neighboring road sections is based on the E. V. Gavrilov's concept on coordination of some parameters of road sections which can be expressed in the entropy characteristics. The paper proposes to execute selection of coordination criteria according to accident rates because while moving

Адрес для переписки
Кульбашная Надежда И.
Харьковский национальный университет
городского хозяйства имени А. Н. Бекетова
ул. Революции, 12,
61002, г. Харьков, Республика Украина
Тел.: +380 57 707-32-14
kulbaka.nadya@yandex.ru

Address for correspondence
Kulbashnaya Nadezhda I.
O. M. Beketov National University
of Urban Economy
12 Revolution str.,
61002, Kharkov, Republic of Ukraine
Tel.: +380 57 707-32-14
kulbaka.nadya@yandex.ru

along neighboring road sections traffic conditions change drastically that can result in creation of an accident situation. Relative organization of a driver's perception field and driver's interaction with the traffic environment has been selected as entropy characteristics. Therefore, the given characteristics are made conditional to the road accidents rate. The investigation results have revealed a strong correlation between the relative organization of the driver's perception field and the relative organization of the driver's interaction with the traffic environment and the accident rate. Results of the executed experiment have proved an influence of the accident rate on the investigated entropy characteristics.

Keywords: entropy characteristics, road accident rate, road environment, coordination, neighboring section, relative organization of interaction

For citation: Kulbashnay N. I. (2016) Entropy Characteristics in Models for Coordination of Neighboring Road Sections. *Science & Technique*. 15 (1), 78–84 (in Russian)

Для формирования методических основ анализа и оценки состояния среды движения существенное значение на современном этапе имеет применение новых областей знаний, использование которых предполагает целенаправленное оптимальное управление сложными динамическими системами, к которым относятся, в частности, и система «водитель – автомобиль – дорожная среда». Применение теории информации позволило прийти к новым подходам по решению проблемы выявления и оценки аварийно-опасных участков на автомобильных дорогах общего пользования. Актуальное направление математического анализа – энтропийные методы [1, 2], в основе которых лежит использование энтропийных характеристик в качестве критериев оценки функционирования системы, в частности системы «водитель – автомобиль – дорожная среда».

Применение методов, базирующихся на энтропии, решает задачу неоднородности в системе [3, 4]. Неоднородность среды движения как системы обусловлена тем, что она содержит большое число разнородных элементов, влияние которых на водителя может быть определено по-разному. И это создает трудности, когда необходимо выделить наиболее важный параметр для определения функционирования системы.

Таким образом, энтропийные характеристики, оценивающие информационную нагрузку водителя, могут являться параметрами оценки взаимодействия водителя с дорожной средой. Значимость исследования такого взаимодействия актуальна на участках дорог, где быстро меняется дорожная обстановка. Особо неблагоприятным является сочетание участков, на которых условия движения резко изменяются. В таких случаях процесс психологического

восприятия водителем дорожной обстановки сопровождается периодическими всплесками эмоциональной напряженности, вызываемыми возникновением переходного процесса у водителя. Все это может способствовать развитию усталости водителя, вызывать его ошибочные действия и приводить к созданию аварийной ситуации. Чтобы избежать подобных ситуаций, необходимо создание таких условий движения, которые обеспечивали бы сохранение оптимального уровня эмоциональной напряженности водителя при движении по дороге. Выход для решения данных проблем может быть найден путем согласования смежных участков дорог.

Существует метод согласования смежных участков дорог по скоростям движения, разработанный В. Ф. Бабковым [4]. Несмотря на простоту подхода к вопросу, в нем не учитывается вариабельность скоростей движения возле границы участка, что не позволяет исключить неоднородность и неоднозначность воздействия среды движения на водителя.

В дальнейшем широкое применение нашли методы, учитывающие информационное воздействие среды на водителей и механизм влияния мероприятий психологического характера на скорость движения. Методы теории информации для оценки взаимодействия водителя со средой движения достаточно широко применялись в исследованиях.

Э. В. Гаврилов применил энтропийные характеристики при оценке надежности взаимодействия водителя со средой движения и согласно такому подходу выявил условие адекватности между водителем и средой движения [4, 5]. Э. В. Гавриловым, И. Э. Линник и А. В. Банатовым значение максимальной энтропии используется во взаимосвязи с града-

цией показателей функционального состояния водителей для оценки безопасности дорожного движения в городских условиях [6].

В исследованиях Л. А. Коваленко оценено влияние информационных характеристик поля восприятия водителя на выбор дистанции между транспортными средствами, а также выявлена связь пропускной способности с информационными характеристиками среды движения [7].

Х. Креспо в исследованиях применял информационные характеристики поля восприятия водителей для оптимизации элементов дорожной обстановки при планировании мероприятий по повышению уровня удобства движения [8].

Рассмотренные методы, учитывающие информационное взаимодействие водителя со средой движения, имеют большое практическое значение, но не решают вопрос обеспечения постоянства и плавности движения путем целенаправленного регулирования информационной загрузки водителя.

Наиболее близко к решению данной проблемы подошел М. В. Саркисян. Исследования данного автора заключаются в разработке модели информационного взаимодействия водителя со средой движения и алгоритма регулирования функциональных норм скоростей движения при помощи направленного воздействия на информационные характеристики поля восприятия водителя [9].

Н. С. Голованенко предлагает использовать энтропийные характеристики как системообразующие факторы для оценки поведения водителя на дороге и объективной характеристики условий движения. Для направленного формирования среды движения с целью регулирования скоростей движения в предшествующих и последующих ситуациях предлагается использовать нормы информационных характеристик поля восприятия водителя [10]. Данный метод определяет только основные направления работ по управлению эргономическим качеством дорог и условий движения, но не дает градацию изменений информационных характеристик вдоль дороги с точки зрения опасности движения.

Таким образом, методы целенаправленного формирования среды движения вдоль дороги,

нацеленные на исключение возникновения переходных процессов у водителя, до настоящего времени остаются не доработанными и требуют нового подхода, а именно согласования условий на смежных участках дорог.

Продуктивным способом согласования параметров смежных участков дороги является метод, предложенный Э. В. Гавриловым. По его теории, согласование смежных участков дорог заключается в согласовании индивидуальных норм водителей, действующих на участках. Параметры индивидуальных норм могут быть найдены через информационные характеристики среды движения: максимальную и текущую энтропию или относительную организацию поля восприятия водителя [11].

В [12] показано, что для согласования смежных участков дорог не обязательно обеспечивать на них одинаковые параметры, а необходимо достичь минимального расхождения суммарной информационной загрузки водителя на смежных участках. Такой подход дает возможность получить комплексный результат воздействия среды движения на водителя.

Цель данной статьи – подобрать параметры, которые могли бы быть использованы как критерии для согласования условий на смежных участках с точки зрения безопасности движения и отражали все этапы процесса согласования: обеспечивали совместимость условий среды движения с деятельностью водителей и возможность привести в необходимое соответствие условия движения на близлежащих участках.

В качестве критерия взаимодействия участников движения со средой используется значение относительной организации, которая определяется по формуле Г. Ферстера [13]

$$R = 1 - \frac{H}{H_m}, \quad (1)$$

где R – относительная организация взаимодействия; H – текущая энтропия взаимодействия; H_m – максимальная энтропия системы.

По величине относительной организации взаимодействия, которая лежит в пределах $0 < R < 1$, можно судить о детерминированности или стохастичности взаимодействия.

При $R = 1$ взаимодействие детерминированное, при $R = 0$ – случайное.

Как показано в [12], согласование условий на смежных участках дорог сводится к согласованию значений относительной организации поля восприятия водителя $R_{пв}$. Значение данного показателя определяется через величину текущей энтропии, которая зависит от количества объектов, расположенных в пределах поля восприятия водителя, и вероятности нахождения каждого из объектов поля восприятия в опасном для движения состоянии [11].

Как известно, воздействие объектов среды движения на водителя влияет на изменение его скорости движения. Фиксирование скорости в определенные промежутки времени позволяет получить вариabельность скоростей движения. Такая вариabельность скорости, как любая неопределенность и неоднозначность, может быть выражена через значения энтропийных характеристик, в частности через значения относительной организации взаимодействия водителя со средой движения R_v .

Таким образом, прослеживается определенная взаимосвязь между двумя рассматриваемыми показателями. Если оценивать данные показатели с точки зрения безопасности движения, то можно поставить их в зависимость от коэффициента происшествий $K_{пр}$.

Анализ эмпирических данных показал криволинейный характер связи $K_{пр} = f(R_v)$ и $K_{пр} = f(R_{пв})$ (рис. 1). Обработка экспериментальных данных методом наименьших квадра-

тов позволила получить эмпирические формулы:

$$K_{пр} = 40,762R_v^2 - 18,776R_v + 3,4873; \quad (2)$$

$$K_{пр} = 146,56R_{пв}^2 - 107,27R_{пв} + 21,05. \quad (3)$$

Теснота связи между показателем относительной организации взаимодействия R_v с коэффициентом происшествий оценивалась по величине индекса корреляции, равно-го $r = 0,776$.

Поскольку $r > 0,7$, это подтверждает гипотезу о наличии сильной связи $K_{пр} = f(R_v)$. Достоверность индекса корреляции оценивали по t -критерию Стьюдента. Квадратическая ошибка $m_\eta = 0,07096$, критерий достоверности $t_p = 10,936$. Поскольку рассчитанные значения t_p больше табличных $t_m = 3,29$ для 0,1%-й обеспеченности, можно принять, что рассчитанное корреляционное отношение вполне достоверно.

Аналогично связь между относительной организацией поля восприятия $R_{пв}$ с коэффициентом происшествий $K_{пр}$ оценивали по величине индекса корреляции $r = 0,743$, что подтверждает гипотезу о наличии сильной связи $K_{пр} = f(R_{пв})$. Достоверность индекса корреляции оценивали по t -критерию Стьюдента. Квадратическая ошибка $m_\eta = 0,1033$, критерий достоверности $t_p = 7,191$. Поскольку рассчитанные значения t_p больше табличных $t_m = 3,54$ для 0,1%-й обеспеченности, можно принять, что рассчитанное корреляционное отношение вполне достоверно.

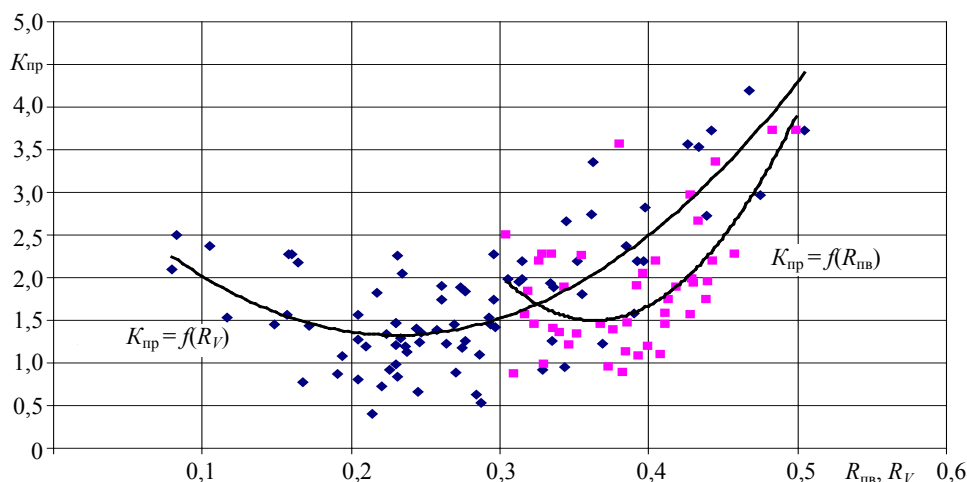


Рис. 1. Зависимость показателей R_v и $R_{пв}$ от коэффициента происшествий $K_{пр}$

Fig. 1. Dependence of R_v and $R_{пв}$ indices on accident rate $K_{пр}$

При обработке результатов эксперимента необходимо проверить влияние какого-либо фактора на исследуемый показатель деятельности. Поэтому рассмотрим, как влияет коэффициент происшествий на показатели R_V и $R_{пв}$.

Среднее значение и дисперсия измеряемой величины на i -м уровне изменения фактора определяются по формулам [14, 15]:

$$\bar{K}_{при} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K_{при}; \quad (4)$$

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (K_{при} - \bar{K}_{при})^2. \quad (5)$$

Результаты первого эксперимента приведены в табл. 1.

Таблица 1

Обработка результатов первого эксперимента
Processing of the first experiment results

R	f_i	$\bar{K}_{при}$	$\sum_{i=1}^N f_i \sigma_i^2$	σ_i^2
0,1104	4 – 1 = 3	2,3015	0,5883	0,1961
0,1711	9 – 1 = 8	1,5180	3,5976	0,4497
0,2318	27 – 1 = 26	1,2367	5,5796	0,2146
0,2925	18 – 1 = 17	1,5255	3,6635	0,2155
0,3532	11 – 1 = 10	1,6482	7,8520	0,7852
0,4139	8 – 1 = 7	2,3528	4,3946	0,6278
0,4746	4 – 1 = 3	3,5220	0,6438	0,2146
	$\Sigma = 74$		$\Sigma = 26,3190$	

Полученные экспериментальные данные имеют различное число повторных опытов. Поэтому проверку воспроизводимости экспериментальных данных осуществим с помощью критерия Бартлета [16]

$$U^2 = \frac{1}{c} \left\{ f \lg \sigma^2 - \sum f_i \lg \sigma_i^2 \right\}, \quad (6)$$

с учетом, что $c = 0,4343 \left[1 + \frac{1}{3(N-1)} \left\{ \sum_{i=1}^N \frac{1}{f_i} - \frac{1}{f} \right\} \right]$;

$f = \sum f_i$, где N – число сравниваемых дисперсий; $(N-1)$ – то же степеней свободы; f_i – то же степеней свободы в i -й серии; $f_i = n_i - 1$; n_i – то

же зарегистрированных попаданий в i -й серии; σ_i^2 – дисперсия в i -й серии эксперимента; σ^2 – то же воспроизводимости.

Расчет дает значение $c = 0,4593$.

Дисперсия воспроизводимости определяется по формуле согласно [16]

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N f_i \sigma_i^2}{\sum_{i=1}^N f_i}. \quad (7)$$

Расчет дает величину $\sigma^2 = 0,3557$.

Согласно критерию Бартлета величина U^2 приближенно подчиняется χ^2 – распределению с $(N-1)$ степенями свободы. Критерий Бартлета базируется на нормальном распределении [16]

$$\chi^2 = \frac{1}{c} \left\{ f \lg \sigma^2 - \sum f_i \lg \sigma_i^2 \right\} = 10,5828. \quad (8)$$

Табличное значение критерия Пирсона $\chi^2_{табл} = 12,6$ для $p = 0,05$ и числа степеней свободы $7 - 1 = 6$. Поскольку $\chi^2 < \chi^2_{табл}$, дисперсии однородны.

Результаты второго эксперимента приведены в табл. 2.

Проверим влияние коэффициента происшествий на относительную организацию взаимодействия поля восприятия водителя.

Таблица 2

Обработка результатов второго эксперимента
Processing of the second experiment results

R	f_i	$\bar{K}_{при}$	$\sum_{i=1}^N f_i \sigma_i^2$	σ_i^2
0,3206	9 – 1 = 8	1,7425	1,8200	0,2275
0,3530	8 – 1 = 7	1,7028	0,7966	0,1138
0,3855	9 – 1 = 8	1,4245	1,3648	0,1706
0,4179	11 – 1 = 10	1,9738	3,1032	0,3103
0,4504	5 – 1 = 4	2,2513	2,0932	0,5233
0,4829	2 – 1 = 1	3,4915	0	0
	$\Sigma = 38$		$\Sigma = 9,1776$	

Расчет дает значения: $c = 0,4808$ и $\sigma^2 = 0,2415$.

Табличное значение критерия Пирсона $\chi^2_{\text{табл}} = 11,1$ для $p = 0,05$ и числа степеней свободы $6 - 1 = 5$. Поскольку $\chi^2 = 1,3556$, т. е. $\chi^2 < \chi^2_{\text{табл}}$, тогда дисперсии однородны.

В этой связи можно говорить о большой информативности параметров R_V и $R_{\text{пв}}$ для оценки опасности участков дорог и использовать эти показатели в качестве критериев для согласования условий на смежных участках дорог.

ВЫВОД

Установлено, что энтропийные характеристики – относительная организации поля восприятия водителя и относительная организация взаимодействия водителя со средой движения – могут быть использованы в качестве критериев для согласования условий на смежных участках дорог.

Использование этих критериев в дальнейших исследованиях может осуществляться поэтапно:

- на первом этапе – по относительной организации поля восприятия водителя, что позволяет привести в соответствие деятельность водителя с дорожной средой и далее минимизировать разницу суммарной информационной нагрузки на смежных участках;
- на втором этапе – по относительной организации взаимодействия водителя со средой движения, что позволяет привести в соответствие вариабельности скоростей движения на смежных участках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gray, R. M. *Entropy and Information Theory* / R. M. Gray. Springer, 2011. 409 p.
2. Marek, J. *Traffic Environment and the Driver. Driver Behavior and Training in International Perspective* / J. Marek, T. Sten. Springfield: Thomas, 1977. 248 p.
3. *Entropy, Search, Complexity* / I. Csiszar [et al.]. Springer, 2007. 264 p.
4. Бабков, В. Ф. Дорожные условия и безопасность движения / В. Ф. Бабков. М.: Транспорт, 1982. 288 с.
5. Cover, T. M. *Elements of Information Theory* / T. M. Cover, J. A. Thomas. Wiley-Interscience, 2006. 748 p.
6. Гаврилов, Э. В. Оценка безопасности движения в городских условиях / Э. В. Гаврилов, И. Э. Линник, А. В. Банатов // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожного університету. 2002. Вип. 17. С. 57–62.

7. Коваленко, Л. А. Оценка пропускной способности двухполосных автомобильных дорог с учетом закономерностей поведения водителей / Л. А. Коваленко. Киев: НТУ, 2003. 20 с.
8. Креспо, Х. Планирование мероприятий по повышению уровня удобства движения на двухполосных автомобильных дорогах / Х. Креспо. Харьков: ХНАДУ, 1991. 278 с.
9. Саркісян, М. В. Удосконалення методів психологічного і примусового регулювання швидкостей руху на автомобільних дорогах / М. В. Саркісян. Харьков: ХНАДУ, 2003. 20 с.
10. Голованенко, Н. С. Оценка эргономического качества автомобильных дорог и условий движения / Н. С. Голованенко. Харьков: ХАДИ, 1986. 25 с.
11. Гаврилов, Э. В. Системное проектирование автомобильных дорог / Э. В. Гаврилов, А. М. Гридчин, В. Н. Ряпунин. Белгород: Изд-во АСВ, 1998. Ч. 1. 138 с.
12. Кульбашная, Н. И. Формирование информационных характеристик среды движения на участках дорог / Н. И. Кульбашная // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожного університету. 2013. Вип. 61–62. С. 243–247.
13. Фюрстер, Г. Саморегулирующиеся системы / Г. Фюрстер. М.: Мир, 1964. С. 5–23.
14. Основы научных исследований / В. И. Крутов [и др.]. М.: Высш. шк., 1989. 400 с.
15. Spellman, F. R. *Handbook of Mathematics and Statistics for the Environment* / F. R. Spellman, N. E. Whiting. CRC Press. 2013. 860 p.
16. Системологія на транспорті / заг. ред. Ф. М. Дмитріченко, Е. В. Гаврилов [та ін.]. Киев: Знання України, 2007. Кн. II: Технологія наукових досліджень і технічної творчості. 318 с.

Поступила 04.05.2015

Подписана в печать 10.07.2015

Опубликована онлайн 22.01.2016

REFERENCES

1. Gray R. M. (2011) *Entropy and Information Theory*. Springer. 409. Doi: 10.1007/978-1-4419-7970-4.
2. Marek J., Sten T. (1977) *Traffic Environment and the Driver. Driver Behavior and Training in International Perspective*. Springfield, Thomas. 248.
3. Csiszar I., Katona G., Tardos G. (Eds.) (2007) *Entropy, Search, Complexity*. Springer. 264.
4. Babkov V. F. (1982) *Road Conditions and Traffic Safety*. Moscow, Transport. 288 (in Russian).
5. Cover T. M., Thomas J. A. (2006) *Elements of Information Theory*. Wiley-Interscience. 748.
6. Gavrilov E. V., Linnik I. E., Banatov A. V. (2002) Evaluation of Traffic Safety under Urban Conditions. *Visnik Kharkivskogo Natsionalnogo Avtomobilno-Dorozhnogo Universitetu* [Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University], (17), 57–62 (in Russian).

7. Kovalenko L. A. (2003) *Otsenka Propusknoi Spособnosti Dvukhpolosnykh Avtomobilnykh Dorog s Uchetom Zakonomernostei Povedeniia Voditelei* [Evaluation of Two-Way Automobile Road Capacity with Due Account of Regularities in Drivers Behavior]. Kiev: National Technical University. 20 p. (in Russian).
8. Krespo Kh. (1991) *Planirovanie Meropriiatii po Povysheniiu Urovnia Udobstva Dvizheniia na Dvukhpolosnykh Avtomobilnykh Dorogakh* [Planning of Measures on Improvement of Traffic Convenience on Two-Way Automobile Roads]. Kharkiv: Kharkiv National Automobile and Highway University. 278 p. (in Russian).
9. Sarkisian M. V. (2003) *Udoskonalennia Metodiv Psikhologichnogo i Primusovogo Reguliuvannia Shvidkosti Rukhu na Avtomobil'nikh Dorogakh* [Improvement of Methods for Psychological and Forced Regulation of Driving Speed on Automobile Roads]. Kharkiv: Kharkiv National Automobile and Highway University. 20 p. (in Ukrainian).
10. Golovanenko N. S. (1986) *Otsenka Ergonomicheskogo Kachestva Avtomobilnykh Dorog i Uslovii Dvizheniia* [Evaluation of Ergonomic Quality of Automobile Roads and Traffic Conditions]. Kharkov: Kharkov Automobile and Road Institute. 25 p. (in Russian).
11. Gavrilov E. V., Gridchin A. M., Riapukhin V. N. (1998) *System Designing of Automobile Roads. Part. 1*. Belgorod, Publishing House ASV. 138 p. (in Russian).
12. Kulbashnaya N. I. (2013) Formation of Data Characteristics of Traffic Environment on Road Sections. *Visnik Kharkivskogo Natsionalnogo Avtomobilno-Dorozhnogo Universitetu* [Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University], (61–62), 243–247 (in Russian).
13. Foerster H. (1964) *Self-Regulating Systems*. Moscow, Mir, 5–23 (in Russian).
14. Krutov V. I., Grushko I. M., Popov V. V., Savelev A. Ia., Sumarov L. N., Venikov V. A., Kogdov N. M., Timofeeva O. V., Chus A. V., Momot A. I. (1989) *Fundamentals of Research Investigations*. Moscow, Vysshaya Shkola. 400 p. (in Russian).
15. Spellman F. R., Whiting N. E. (2013) *Handbook of Mathematics and Statistics for the Environment*. CRC Press. 860 p.
16. Gavrilov E. V., Dmitrichenka F. M., Dolia V. K., Lano-vii O. T., Linnik I. E., Polishchuk V. P. (2007) *Systematology for Transport. Book. II: Technology of Research Investigations and Technical Creativity*. Kiev: Znannya Ukrainy. 318 p. (in Ukrainian).

Received: 04.05.2015

Accepted: 10.07.2015

Published online: 22.01.2016