ВЕСТНИК

Белорусско-Российского университета

Научно-методический журнал *Периодичность – 4 раза в год*
Издается с октября 2001 г.

3(52) 2016

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

АНТИПЕНКО Г. Л., СУДАКОВА В. А., ШАМБАЛОВА М. Г. Оценка технического состояния зубчатых колес по анализу кинематической погрешности передачи..... 6

ДОВГАЛЕВ А. М., СУХОЦКИЙ С. А. Повышение эксплуатационных свойств плоских поверхностей деталей магнитно-динамическим упрочнением 19

КИСЕЛЕВ М. Г., ДРОЗДОВ А. В., ГАБЕЦ В. Л., ЯМНАЯ Д. А. Математическое и физическое моделирование условий контактирования распиливаемой заготовки, совершающей циркуляционное движение с боковой поверхностью отрезного диска..... 28

МИНАКОВ А. П., ЮШКЕВИЧ Н. М., КАМЧИЦКАЯ И. Д., ИЛЬЮШИНА Е. В., ЗАЙЦЕВ Д. Л. Анализ способов повышения износостойкости направляющих станин металлорежущих станков 40

ПОЛЯКОВ А. Ю., ФУРМАНОВ С. М., СТЕПАНОВ А. А., КОЛОБОВА М. С., ДЕНИСОВ Д. А. Разработка энергосберегающего технологического процесса контактной рельефной сварки кронштейна лифта по кольцевому рельефу 51

РОГАЧЕВСКИЙ Н. И. Теория зацепления витка архимедова червяка с зубьями двухвенцового колеса …..……..……. 63

СИВАЧЕНКО Л. А., СИВАЧЕНКО Т. Л. Управляемые вибрационные машины и технологии – основа создания новой отрасли промышленности – технологического машиностроения……... 74

СУХОЦКИЙ С. А. Исследование микрорельефа плоских поверхностей заготовок, упрочненных магнитно-динамическим накатыванием ….…….……. 86

ТАРАСИК В. П., САВИЦКИЙ В. С. Экспериментальные исследования механизма управления фрикционами автоматической трансмиссии …….……. 95

ФЕДОСЕНКО А. С., ЛОВШЕНКО Ф. Г., ЛОВШЕНКО Г. Ф. Оптимизация условий получения механически легированных композиционных порошковых материалов для напыления износостойких плазменных покрытий …….……..… 107

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

БОЛОТОВ С. В., ИГНАТОВ В. А., ОВСЯННИКОВ К. В. Установка для электрических и тепловых испытаний источников питания дуговой сварки 121

ТРУХАЧЕВ Ф. М., ГУТОРОВ А. И., БОЛОТОВ С. В. Информационно-рекламная система для общественного транспорта «Электронный гид»……..... 128

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

МЕЛЬНИКОВА И. С., ДАЙНЕКО К. Н. Выявление дефектов дорожных асфальтобетонных и цементобетонных покрытий тепловизионным методом и автоматизированная обработка результатов контроля ……..…….…… 136

ФИЗИКА

СТАРОВОЙТОВ А. Г., ВАСИЛЕНКО А. Н., ХОМЧЕНКО А. В., ЧЕРКАСОВА И. А. Оценка погрешности измерения двулучепреломления методом оптической поляриметрии ……..……. 146

ХОМЧЕНКО А. В. Исследование свойств электро-
обогреваемых стеклопакетов…….… 152

СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

БОРИСЮК А. П., ЗЯТЮК Ю. Ю. Исследование
деформационных характеристик фибробетона со
стальной фиброй ……...…….….… 160

МЕЛЬНИК И. В., СОРОХТЕЙ В. М., ПРИСТАВСКИЙ Т. В.
Экспериментально-теоретические исследования продав-
ливания верхней полки монолитной железобетонной
плиты с пустотообразующими вкладышами ……..... 169

ЭКОНОМИКА. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

ПУЗАНОВА Т. В., ЕРМОЛЕНКО А. О. Управление
конкурентоспособностью продукции предприятия
машиностроения ……... 179

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

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING

ANTIPENKO G. L., SUDAKOVA V. A., SHAMBALOVA M. G. Evaluation of technical condition of toothed gears based on the analysis of the kinematic error of a gear transmission ……..... 6

DOVGALEV A. M., SUKHOTSKY S. A. Improvement of performance of flat workpiece surfaces by using magneto-dynamic hardening ……..…...……. 19

KISELEV M. G., DROZDOV A. V., GABETS V. L., YAMNAYA D. A. Mathematical and physical modeling of interaction of a circulating sawed workpiece with a lateral surface of a cutoff disk ……....……..... 28

MINAKOV A. P., YUSHKEVICH N. M., KAMCHITSKAYA I. D., ILYUSHINA Y. V., ZAITSEV D. L. Analysis of methods to improve wear resistance of bedways of machine tools ……...….. 40

POLYAKOV A. Y., FURMANOV S. M., STEPANOV A. A., KOLOBOVA M. S., DENISOV D. A. Development of a power-saving technological process of resistance projection welding of lift brackets by using annular projections……..... 51

ROGACHEVSKY N. I. Theory of engagement of the thread of an archimedean worm with the teeth of a double-rim wheel gear ……..…..……..... 63

SIVACHENKO L. A., SIVACHENKO T. L. Controlled vibratory machines and technologies as the basis for creating a new industry – processing machine-building……. 74

SUKHOTSKY S. A. Study of microrelief of flat workpiece surfaces hardened by magneto-dynamic roll forming ……..…. 86

TARASIK V. P., SAVITSKY V. S. Experimental research on the automatic transmission friction clutches control ……. 95

FEDOSENKO A. S., LOVSHENKO F. G., LOVSHENKO G. F. Optimization of producing mechanical alloyed composite powder materials for wear-resistant sprayed plasma coatings ……... 107

ELECTRICAL ENGINEERING

BOLOTOV S. V., IGNATOV V. A., OVSYANNIKOV K. V.
Installation for electric and thermal testing of arc welding power sources ……..... 121

TRUKHACHEV F. M., GUTOROV A. I., BOLOTOV S. V.
«Electronic guide» information and advertising system for public transport……..... 128

INSTRUMENT MAKINGNG

MELNIKOVA I. S., DAINEKO K. N. Detection of defects of asphalt and cement road pavements using the thermographic control method and automated processing of the control results …….. 136

PHYSICS

STAROVOYTOV A. G., VASILENKO A. N., KHOMCHENKO A. V., CHERKASOVA I. A.
Estimation of birefringence measurement inaccuracy by use of optical polarimetry ……..……..……..… 146

KHOMCHENKO A. V. Investigation of properties of electrically heated double glazing windows ……..…….……. 152

CIVIL ENGINEERING. ARCHITECTURE

BORYSYUK A. P., ZIATYUK Y.Y. Research on deformation characteristics of fiber concrete with steel fiber……..……..... 160

MELNYK I. V., SOROKHTEY V. M., PRYSTAVSKYY T. V.
Experimental and theoretical studies of punching the top shelf of a monolithic reinforced concrete slab with void forming inserts ……..……..….... 169

ECONOMICS. ECONOMIC SCIENCES

PUZANOVA T. V., ERMOLENKO A. O. Product competetiveness management at a machine-building enterprise ……..……..... 179

/

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 629.114.2

Г. Л. Антипенко, В. А. Судакова, М. Г. Шамбалова

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ПО АНАЛИЗУ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ПЕРЕДАЧИ

UDC 629.114.2

G. L. Antipenko, V. A. Sudakova, M. G. Shambalova

EVALUATION OF TECHNICAL CONDITION OF TOOTHED GEARS BASED ON THE ANALYSIS OF THE KINEMATIC ERROR OF A GEAR TRANSMISSION

Аннотация

Описан метод оценки технического состояния зубчатых колес передач, основанный на анализе характера изменений кинематической и циклической погрешностей при отслеживании относительных угловых перемещений ведущего и ведомого валов импульсным способом. Предложенный метод позволяет выявлять наличие единичных дефектов зубьев, определять их величину и место расположения в кинематической цепи трансмиссии, оценивать неравномерность износа зубьев или эксцентриситета как одной пары зубчатых колес, так и многоступенчатой передачи.

Ключевые слова:

трансмиссия, зубчатые колеса, единичный дефект, кинематическая погрешность, относительные угловые перемещения, импульсный способ.

Abstract

The article describes the method for ng technical condition of toothed gears in gear transmissions based on the analysis of changes in kinematic and cyclic errors while tracking the relative angular displacements of driving and driven shafts by using a pulse method. The proposed method allows detecting defects of individual teeth, determining their size and location in the kinematic chain of the transmission, estimating the eccentricity or uneven wear of teeth both in gears of one pair and in a multiple transmission.

Key words:

gear transmission, toothed gears, single defect, kinematic error, relative angular displacements, pulse method.

Введение

Одно из важнейших требований при производстве автомобилей, карьерных самосвалов, тракторов, строительно-дорожной техники – это высокая надежность в эксплуатации. Существуют два направления повышения надежности машин – совершенствование системы технической эксплуатации в направлении поддержания начального уровня надежности машин во время всего срока службы и повышение начального уровня надежности за счет увеличения стоимости машин. Зубчатые передачи, являясь неотъемлемой частью этих машин, во многом определяют их надежность. С течением времени техническое состояние зубчатых передач

© Антипенко Г. Л., Судакова В. А., Шамбалова М. Г., 2016

ухудшается: изнашиваются рабочие поверхности зубьев, возникают единичные дефекты – обломы зубьев или их частей, сколы или выкрашивания рабочих поверхностей зубьев вследствие усталостных разрушений, появляется кинематическая погрешность передачи из-за неравномерного износа зубьев по окружности. Все это неизменно сказывается на неравномерности вращения ведомого вала, вызывающей дополнительные динамические нагрузки. Они могут не вызывать непосредственно поломок деталей, но существенно сказываются на их усталостной прочности и долговечности.

Нормативными документами по техническому диагностированию трансмиссий мобильных машин предусматривается оценивать состояние зубчатых передач по суммарному угловому зазору, характеризующему износ рабочих поверхностей зубьев. Но суммарный угловой зазор – это интегральный показатель, который не дает полного представления о состоянии отдельных элементов привода, поскольку он может быть получен из-за большого износа одного зубчатого колеса или небольших износов всех колес привода. Теоретически, если некоторые зубчатые колеса участвуют в передаче вращения на разных ступенях коробки передач в трансмиссии, то, составив матрицу диагностирования по передачам, можно с какой-то долей вероятности вычленить те зубчатые колеса, которые имеют наибольший износ. Но на практике таких алгоритмов нет. С точки зрения восстановления работоспособности трансмиссии это является существенным недостатком такого диагностического параметра как суммарный угловой зазор, поскольку при его превышении нельзя заранее оценить объемы необходимых ремонтных работ.

Для зубчатых колес редукторов в приводах грузоподъемных кранов прекращение эксплуатации предусмотрено при износе зуба по делительной окружности свыше 20 % либо при поломке зуба или при выкрашивании более 30 % поверхности зуба на глубину более 5 % толщины зуба [1]. Поломка одного зуба не приведет к заклиниванию редуктора, поскольку имеется перекрытие передачи, но вызовет дополнительные динамические нагрузки, приводящие к быстрому разрушению привода или металлоконструкции, на которой закреплен привод. В настоящее время точно выявить эти дефекты можно только при вскрытии привода и визуальном осмотре и обмере его зубчатых колес. Поэтому актуальной является задача по разработке метода безразборной оценки состояния зубчатых передач приводов машин в процессе эксплуатации. Если на ранней стадии обнаружить появление единичных дефектов и произвести ремонт, то можно избежать неожиданных поломок трансмиссии в эксплуатации, которые ведут к большим затратам времени и средств на их устранение.

Анализируя работу привода, можно отметить, что вращательное движение в зубчатой передаче передается от ведущего звена к ведомому по рабочей поверхности зуба. В случае возникновения на этих поверхностях дефектов или неравномерного износа зубьев будет появляться неравномерность вращения ведомого вала, вызванная изменением его положения относительно ведущего. Наличие и величину единичных дефектов можно оценить кинематической погрешностью передачи. Кинематическая погрешность зубчатой передачи является величиной, характеризующей кинематическую точность, т. е. согласованность углов поворота ведомого и ведущего валов, а плавность работы передачи характеризуется циклической погрешностью. При этом причиной возникновения кинематической погрешности может служить не только дефект или неравномерный износ рабочих поверхностей зубьев, но и погрешности изготовления и сборки

зубчатых колес, т. е. кинематическая погрешность является комплексным показателем состояния зубчатой передачи, как новой, так и бывшей в эксплуатации. Но, как и в случае использования параметра «суммарный угловой зазор», по кинематической погрешности передачи сложно оценивать состояние отдельных элементов привода. Даже если имеется облом зуба какого-либо колеса, то он по-разному будет отражаться на кинематической погрешности в зависимости от его места расположения в кинематической цепи привода. Следовательно, для поиска такого дефекта, как облом зуба, необходимо знать, как он отражается на кинематической погрешности в зависимости от его места расположения. Это существенно осложняет задачу, поскольку надо вначале определить местонахождение дефекта, а потом по его величине на выходе привода оценить реальную величину дефекта зуба. Попытки решить эту задачу с помощью виброакустических методов не привели к созданию надежных алгоритмов диагностирования.

Величину дефекта можно оценить, отслеживая относительные углы поворота $\Delta\varphi$ ведущего зубчатого колеса по отношению к ведомому, а место расположения дефекта – по шагу его повторного появления и сопоставления с шагом полного оборота того или иного колеса, находящегося в том или ином месте кинематической цепи передачи. Необходимо знать, какой дефект покажет выломанный зуб, т. к. зубчатая передача характеризуется коэффициентом перекрытия. Для решения задачи определения разницы углов поворота ведущего колеса относительно ведомого при прохождении максимального дефекта создана анимационная модель, особенностью которой является то, что перемещение ведомого колеса осуществляется путем обкатки поверхностей сопрягаемых профилей зубьев, позволяющей обкатывать и контур дефекта, переводя его в угол поворота ведомого зубчатого колеса [2].

Приняв за максимальную величину дефекта облом одного зуба и смоделировав на анимационной модели прохождение этого дефекта, установили, что разница $\Delta\varphi$ действительного угла поворота зубчатого колеса с теоретическим углом поворота будет существенно меньше самого дефекта, поскольку по условию непрерывности и плавности хода передачи коэффициент торцового перекрытия больше единицы (рис. 1). Исследования показали, что облом зуба соответствует дефекту в виде выкрашивания рабочей поверхности зуба по всей ширине, равной 0,3 его толщины по диаметру делительной окружности зубчатого колеса s.

Для теоретического определения угла рассогласования $\Delta\varphi$ при максимальном дефекте следует иметь в виду, что дефект зуба может проявиться только в зоне однопарного зацепления. Прохождение дефекта при передаче момента будет сопровождаться ускоренным движением ведущего вала, поскольку происходит разрыв кинематической связи и сопротивление движению становится равным нулю. После прохождения дефекта кинематическая связь восстанавливается за счет ускоренного поворота ведомого колеса путем обкатки сопрягаемой поверхности последующим зубом. По этой причине и появляются дополнительные динамические нагрузки в приводе, в котором имеются единичные дефекты.

Но единичный дефект – это импульсное, кратковременное воздействие, влияющее на неравномерность вращения выходного вала привода, которая оценивается кинематической погрешностью передачи. Циклическая погрешность передачи, включающая накопленную погрешность шага зацепления, вызванную как неравномерным износом зубьев по окружности, так и погрешностью изготовления и монтажа, кроме дефектов, вызывает неравномер-

ность вращения. Таким образом, кинематическая погрешность – это интегральный показатель, включающий влияние как единичных или локальных дефектов зубьев, так и циклической погрешности. Если выделить из кинематической погрешности эти составляющие, ее можно использовать как информативный диагностический параметр для более точной оценки технического состояния зубчатых передач и перспектив их дальнейшей эксплуатации.

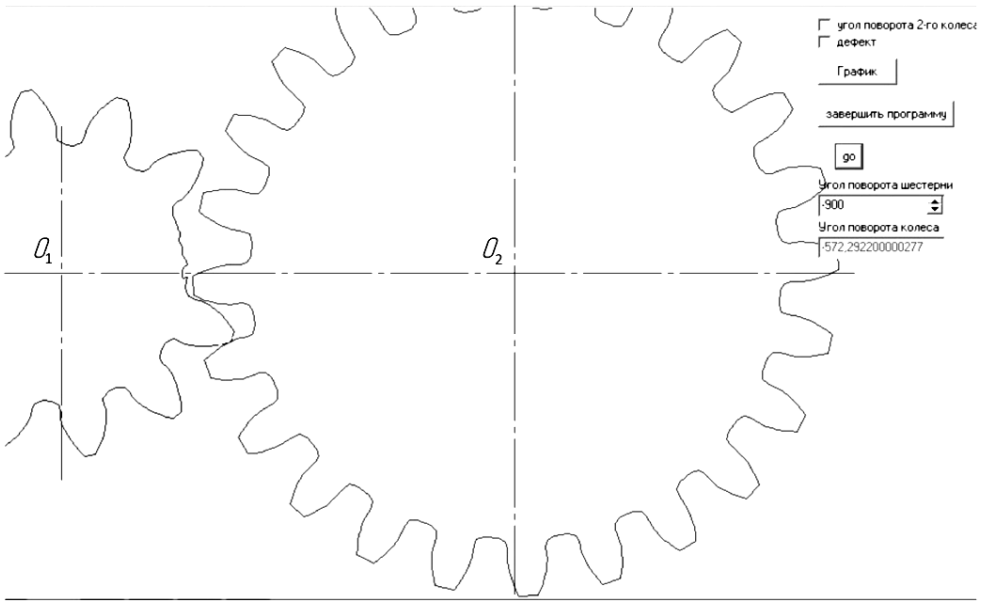


Рис. 1. Обкатка максимального дефекта зуба

В зависимости от назначения приводов зубчатые колеса изготавливаются различных степеней точности, для которых установлены нормы кинематической точности, нормы плавности и контакта зубьев колес и передач, а их предельные величины в эксплуатации не определены. С другой стороны, одним из признаков предельного состояния привода является появление единичного дефекта в виде выломанного зуба. Следовательно, задачей диагностики зубчатого привода в эксплуатации является не только определение суммарного углового зазора, но и поиск обломов зубьев в кинематической цепи привода.

Неравномерность вращения выходного вала, а следовательно, и кинематическую погрешность оценивают по результатам измерения колебаний частоты вращения за один оборот диагностируемой передачи. Для измерения неравномерности частоты вращения применяют специальные приборы – кинематомеры, имеющие, как правило, на выходе регистрирующие приборы. Приспособить их для диагностики приводов в процессе эксплуатации довольно проблематично. По мнению авторов, наиболее приемлемым способом определения неравномерности вращения выходного вала является контроль относительных угловых перемещения ведущего и ведомого валов импульсным способом с помощью компьютерных средств. Для этого с ведущим зубчатым колесом связывают датчик углового перемещения высокой (опорной) частоты, а с ведомым, в зависимости от задач диагностирования, либо датчик зубцовой частоты ведомого колеса – для оценки наличия и величины единичного дефекта, либо высокочастотный датчик углового положения ведомого вала – для оценки циклической погрешности передачи, информация от которых обраба-

тывается компьютером по определенным алгоритмам [3]. Схема импульсного способа контроля относительных угловых перемещений ведущего и ведомого зубчатых колес показана на рис. 2.

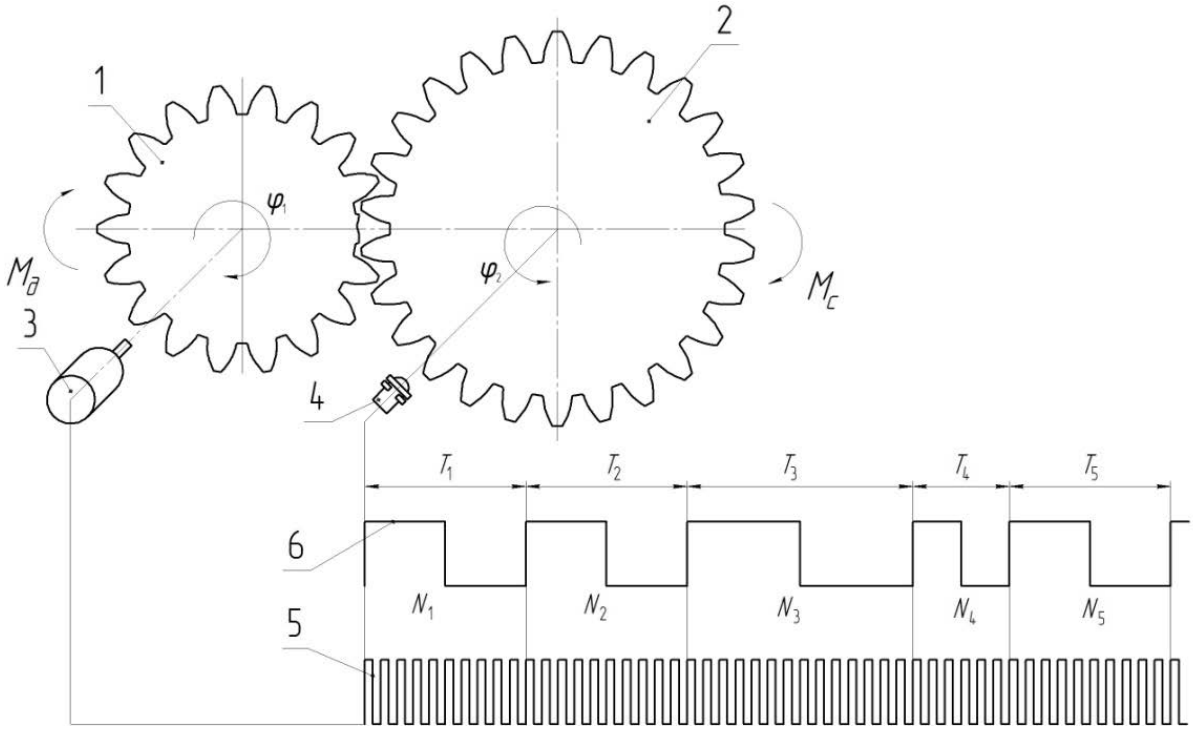


Рис. 2. Схема импульсного способа контроля относительных угловых перемещений ведущего и ведомого колес зубчатой передачи: 1 – ведущее колесо; 2 – ведомое колесо; 3 – датчик опорного сигнала; 4 – датчик выходного сигнала; 5 – импульсы опорного сигнала; 6 – импульсы от каждого зуба ведомого колеса

С ведущим колесом 1 связан задатчик опорного сигнала 3, в качестве которого использован энкодер (датчик угла поворота) с высоким разрешением, выдающий большое количество (до 2500) импульсов опорного сигнала 5 за один оборот ведущего колеса (угол φ_1) при подведении крутящего момента $M_д$, а с ведомым зубчатым колесом 2, на которое действует момент сопротивления M_c, связан датчик 4, выдающий импульсы от каждого зуба 6 ведомого колеса при повороте его на угол φ_2, которые поступают на плату сбора данных для накопления информации и последующей передачи на компьютер для обработки массивов данных (обработка может осуществляться в режиме реального времени).

Алгоритм поиска единичных дефектов зубьев в этом случае включает анализ шага зацепления ведомого колеса по количеству импульсов опорного сигнала, генерируемых датчиком угла поворота ведущей шестерни. При отсутствии дефекта зуба количество опорных импульсов $N1$ и $N2$ (см. рис. 2) на каждом шаге зубчатого колеса $T1$ и $T2$ одинаковое, поскольку между ведомым и ведущим колесами имеется жесткая кинематическая связь. Отклонение количества импульсов опорного сигнала $N3$ и $N4$ в двух последовательных шагах зубьев $T3$ и $T4$ от других значений ($T1$, $T2$, $T5$) сначала в большую сторону, а затем в меньшую свидетельствует о наличии дефекта зуба, поскольку при прохождении дефекта ведущий вал поворачивается на больший угол, т. к. ведомый останавливается при разрыве кинематической связи, а затем

на меньший, поскольку движение ведомого колеса ускоряется при восстановлении кинематической связи. При этом разница в количествах опорных импульсов будет характеризовать величину дефекта, а их сумма в шагах *T*3 и *T*4 будет равна сумме опорных импульсов шагов *T*1 и *T*2, т. к. после прохождения единичного дефекта кинематическая связь восстанавливается.

Чем больше разность между большим и меньшим значениями опорных импульсов в шагах *T*3 и *T*4, соответствующих прохождению зуба и впадины, тем больше дефект. Если соотнести эту разницу, соответствующую прохождению дефектного зуба к половине опорных импульсов в шаге, при котором кинематическая связь не была нарушена, например в шаге *T*1 или *T*2, то получим величину дефекта в долях толщины зуба по делительной окружности.

Принадлежность дефекта тому или иному зубчатому колесу можно установить по углу поворота выходного вала при повторном его появлении. Если дефект в зубчатом колесе, расположенном на выходном валу, то он проявляется за полный оборот этого вала, если на ведущем валу, то за один оборот выходного вала он появиться *u* раз, где *u* – передаточное число зубчатой передачи.

Накопленная погрешность шага зацепления зубчатой передачи будет вызывать изменение мгновенного передаточного числа вначале в большую, затем в меньшую сторону, или наоборот. В этом случае в каждом последующем шаге зубьев количество опорных импульсов вначале будет уменьшаться по отношению к теоретическому, а затем увеличиваться.

Экспериментальное определение единичного дефекта зуба импульсным способом.

Для проверки выдвинутых предположений была создана экспериментальная установка (рис. 3), представляющая собой зубчатую пару, имеющую Z_1 = 20 зубьев и Z_2 = 50 зубьев с модулем *m* = 3,15 и толщиной зуба по диаметру делительной окружности *s* = 4,95 мм. С ведущим колесом 1 связан задатчик высокочастотного опорного сигнала 4, представляющий собой фотоэлектрический преобразователь углового перемещения BE-178A, генерирующий 2500 импульсов за один оборот, а с ведомым колесом 2 – аналогичный датчик углового перемещения 5, генерирующий 1024 импульса за один оборот. Напротив зубчатого венца ведомого колеса установлен также датчик зубцовой частоты 3, генерирующий прямоугольные импульсы напряжения на основе эффекта Холла при прохождении под ним каждого зуба. Все датчики запитаны от источника питания 6, а дискретные сигналы от них в виде прямоугольных импульсов поступали на плату сбора данных 7, после чего полученный массив данных обрабатывался по разработанным алгоритмам на ЭВМ 8.

На шестерне зубчатой пары был выполнен единичный дефект зуба, величину и место расположения которого следовало установить.

Идентификацию дефекта проводили по изменению шага зуба ведомого колеса в количестве импульсов опорного сигнала, поступающих с ведущей шестерни. Для установления величины единичного дефекта зубчатой пары и места его нахождения (на ведущем или ведомом колесе) использовалась информация, поступающая от высокочастотного датчика угла поворота ведущего колеса и датчика зубцовой частоты. Параметры импульсной системы, позволяющей установить величину и принадлежность единичного дефекта, сведены в табл. 1.

График, приведенный на рис. 4, а, соответствует результатам проведения диагностирования при отсутствии единичного дефекта зуба в зубчатой передаче. Ось абсцисс графиков соответствует количеству импульсов, генерируемых датчиком зубцовой частоты $N_{вых}$, по оси ординат откладывается количество

опорных импульсов в каждом выходном $N_{оп/вых}$.

При повороте ведомого колеса на один зуб (точка на графике), количество опорных импульсов близко к теоретическому значению в 125 импульсов. Колебание значения этого параметра вызвано как результатами округления подсчета импульсов, так и кинематической погрешностью передачи.

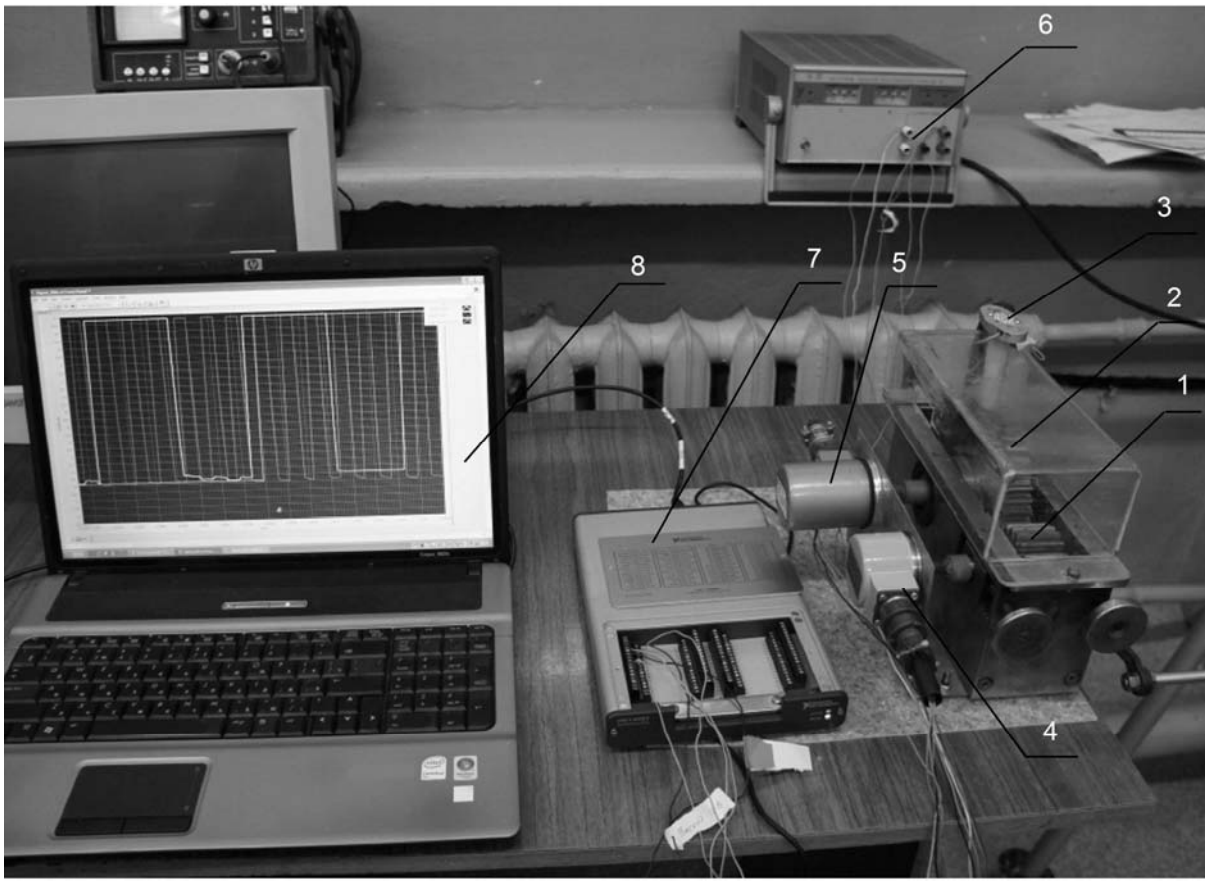


Рис. 3. Экспериментальная установка: 1 – ведущее зубчатое колесо; 2 – ведомое зубчатое колесо; 3 – датчик Холла; 4 – датчик высокочастотного опорного сигнала; 5 – датчик углового перемещения ведомого зубчатого колеса; 6 – блок питания; 7 – плата сбора данных; 8 – ЭВМ

Табл. 1. Параметры импульсной системы для диагностирования единичного дефекта в зубчатой паре

Количество опорных импульсов за один оборот ведущего колеса $N_{оп1}$, имп	Количество опорных импульсов за один оборот ведомого колеса $N_{оп2}$, имп	Шаг повторного появления дефекта на ведущем колесе T_1, имп	Шаг повторного появления дефекта на ведомом колесе T_2, имп	Количество опорных импульсов, приходящихся на один зуб ведомого колеса, $N_{оп1/зуб}$, имп
2500	6250	20	50	125

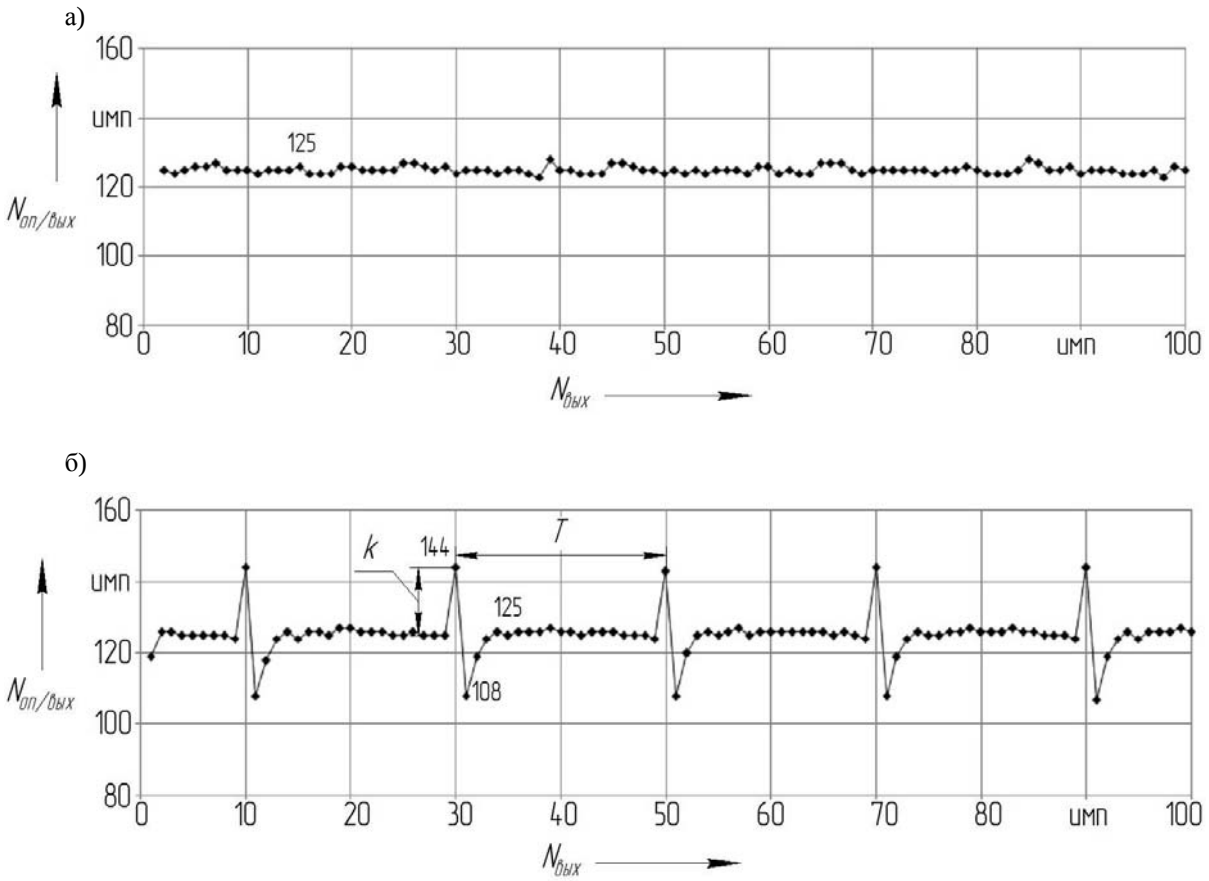


Рис. 4. Графики изменения количества импульсов опорного сигнала на каждом выходном при отсутствии (а) и наличии (б) дефекта зуба

При наличии единичного дефекта график изменения количества импульсов опорного сигнала в каждом выходном имеет вид, представленный на рис. 4, б. Пики на графике соответствуют моменту прохождения дефекта, когда кинематическая связь зубчатых колес нарушается. При прохождении дефекта количество опорных импульсов на одном из шагов резко возрастает от 125 до 144 (ведомое колесо приостанавливается, а ведущее продолжает вращаться и генерировать опорные импульсы), а затем происходит ускоренное восстановление кинематической связи на последующих периодах (108 и 120 импульсов) и восстанавливается до теоретических 125 импульсов. Размер дефекта характеризует величина *k*, которая определяется как разница количества импульсов опорного сигнала в одном выходном при установившейся работе передачи и в момент прохождения дефекта. Для исследуемой зубчатой передачи величина *k*, характеризующая величину дефекта, определится как

$$k = 144 - 125 = 19 \text{ имп.}$$

Величина единичного дефекта *def* определяется как отношение разницы количества импульсов опорного сигнала в одном выходном *k* к половине от теоретического значения импульсов в одном периоде зубцовой частоты $N_{оп1зуб}$, соотнесенной с толщиной зуба по диаметру делительной окружности *s*:

$$def = \frac{2k}{N_{оп1зуб}} \cdot s_c = \frac{2 \cdot 19}{125} \cdot 4,95 = 1,5 \text{ мм.}$$

Дефект величиной 1,5 мм при толщине зуба s = 4,95 мм составляет 30 % его толщины. Шаг повторного появления составляет T_1 = 20 импульсов выходного сигнала, что соответствует принадлежности дефекта ведущему зубчатому колесу. В случае, если дефект находился бы на ведомом колесе, шаг повторного появления был бы T_2 = 50 импульсов.

Таким образом, оценка технического состояния зубчатой пары по анализу характера изменения кинематической погрешности посредством контроля относительных угловых перемещений ведущего и ведомого колес путем подсчета импульсов высокочастотного опорного сигнала в каждом импульсе зубцовой частоты ведомого колеса позволяет установить факт наличия единичного дефекта в зацеплении, выявить степень разрушения зуба и определить принадлежность его к одному из зубчатых колес.

Оценка неравномерности износа зубьев зубчатой пары импульсным способом. При проведении оценки технического состояния любого зубчатого привода необходимо принимать во внимание влияние циклической погрешности передачи на неравномерность вращения выходного вала, т. к. при неравномерном износе зубьев передачи существенно изменяется плавность работы привода. Поэтому важно уметь определять значение циклической погрешности диагностируемой передачи, от которой во многом зависит динамическая нагруженность привода.

Определение циклической погрешности зубчатых колес по их относительным угловым перемещениям предлагается осуществлять с помощью двух высокочастотных датчиков углового положения ведущего и ведомого валов. При использовании на выходном валу датчика с $N_{вых}$ = 1024 импульса за один оборот количество опорных импульсов должно быть постоянным и иметь значение N_{const}.

$$N_{\text{const}} = \frac{N_{оп2}}{N_{вых}} = \frac{6250}{1024} = 6{,}104 \text{ имп.} \quad (1)$$

Наибольшую кинематическую погрешность передачи F'_{ior} можно определить, фиксируя накопленное отклонение фактического значения количества импульсов опорного сигнала в каждом n-м выходном от истинного теоретического значения за эти же n импульсов:

$$F'_{ior} = \sum_{i=1}^{n} N_{oni} - \sum_{i=1}^{n} N_{\text{const}i} . \quad (2)$$

В результате получаем график кинематической погрешности зубчатой передачи F'_{ior} (рис. 5), по которому легко определить наибольшее значение по размаху A изменения кинематической погрешности передачи в импульсах опорного сигнала A = 32 или в угле поворота ведущего вала $\varphi_{рад}$.

$$\varphi_{рад} = 2\pi\, A/uN_{оп1}, \quad (3)$$

где u – передаточное число привода; $N_{оп1}$ – количество импульсов опорного сигнала за один оборот ведущего вала, имп.

При наличии в зубчатой передаче единичного дефекта кинематическая погрешность передачи имеет вид, представленный на рис. 6.

Анализируя графическую зависимость, представленную на рис. 6, по шагу T_1 повторного появления пиков, который соответствует моменту прохождения дефекта, можно установить его принадлежность. За этот шаг ведомое колесо повернулось на угол, соответствующий 410 импульсам выходного сигнала. Поскольку в каждом выходном импульсе содержится 6,104 импульса опорного сигнала, то шаг появления единичного дефекта в количестве импульсов опорного сигнала будет равен 2500, что соответствует одному обороту ведущего зубчатого колеса. Определив принадлежность дефекта, можно найти и его величину. Относительно начала

выброса величина дефекта составляет те же 19 импульсов, что и в предыдущем случае определения величины дефекта, что подтверждает правильность предложенной методики.

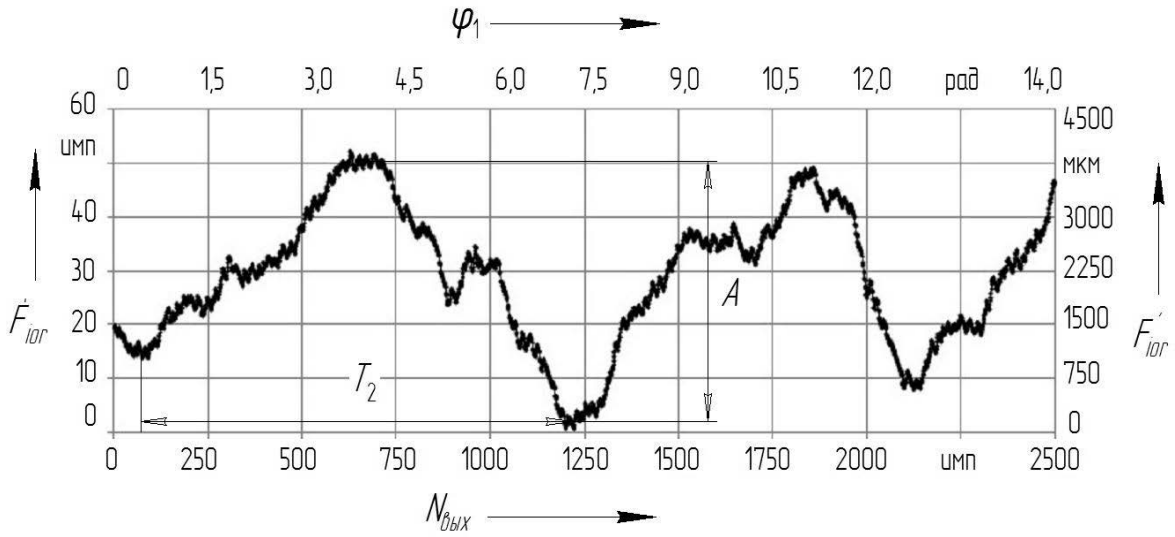


Рис. 5. Определение кинематической погрешности диагностируемой передачи: T_2 – шаг, соответствующий ведомому колесу

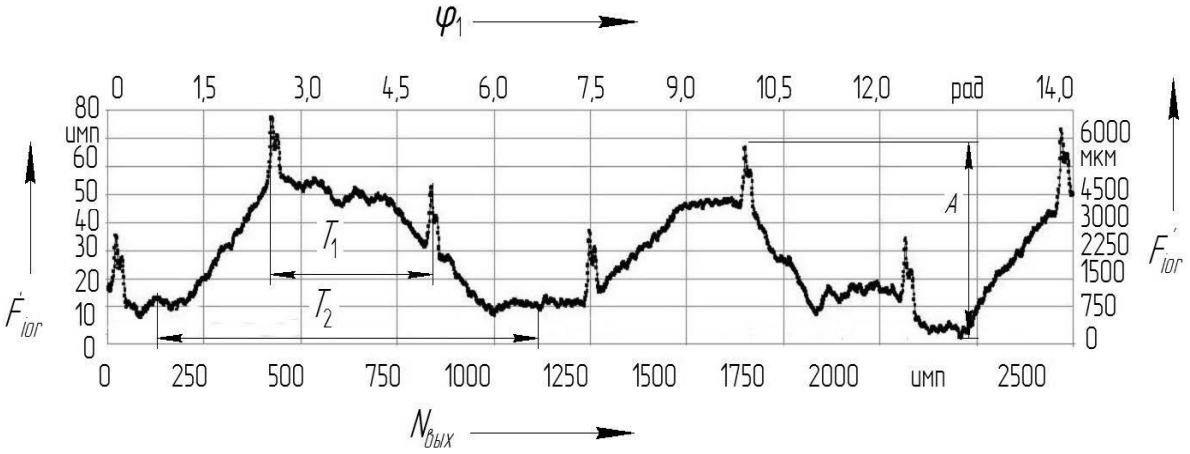


Рис. 6. График кинематической погрешности диагностируемой передачи: T_1 – шаг полного оборота ведущего вала; T_2 – шаг полного оборота ведомого вала; A – максимальный размах изменения циклической погрешности передачи; k – выброс от единичного дефекта

Однако зубчатая передача, состоящая из двух звеньев, на практике встречается довольно редко. Поэтому важно опробовать алгоритм определения кинематической и циклической погрешностей и для многоступенчатого привода.

В качестве многоступенчатого привода для экспериментальных исследований взята четырехступенчатая коробка передач автомобиля, выработавшего свой ресурс, имеющая по две пары зубчатых зацеплений на каждой ступени и обломанный зуб на шестерне ве-

дущего вала (рис. 7).

Для отслеживания относительных угловых перемещений ведущего и ведомого валов привода использовались преобразователи угловых перемещений, генерирующие 2500 и 1024 имп/об соответственно на ведущем и ведомом валах.

Первичный диагностический сигнал по определению количества опорных импульсов в каждом выходном при диагностировании первой передачи с U_2 = 6,4 имеет вид, представленный на рис. 8.

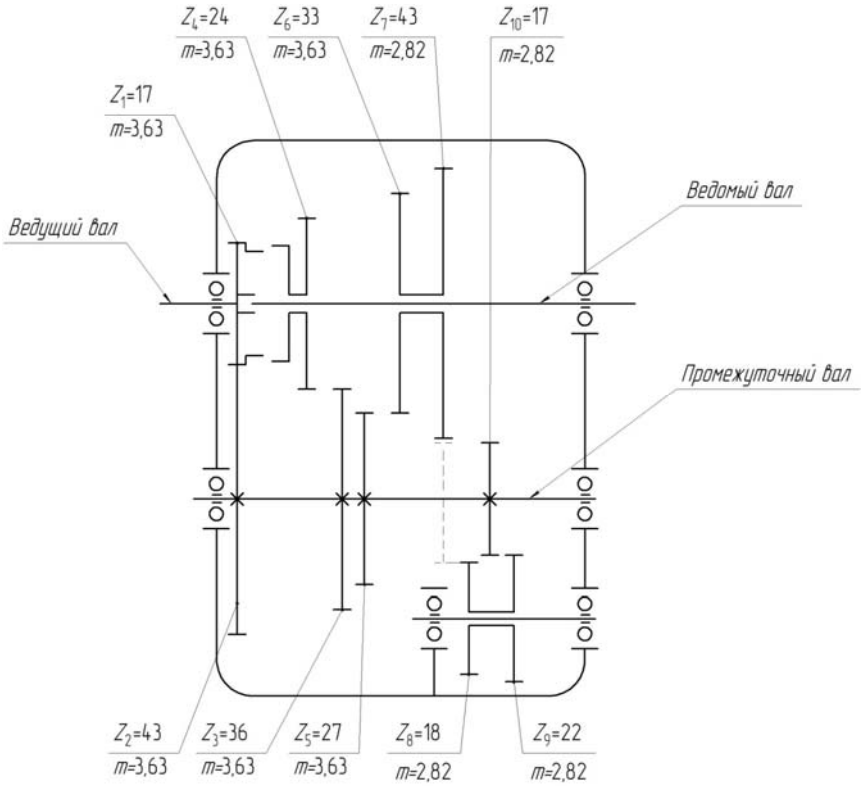


Рис. 7. Четырехступенчатая коробка передач автомобиля

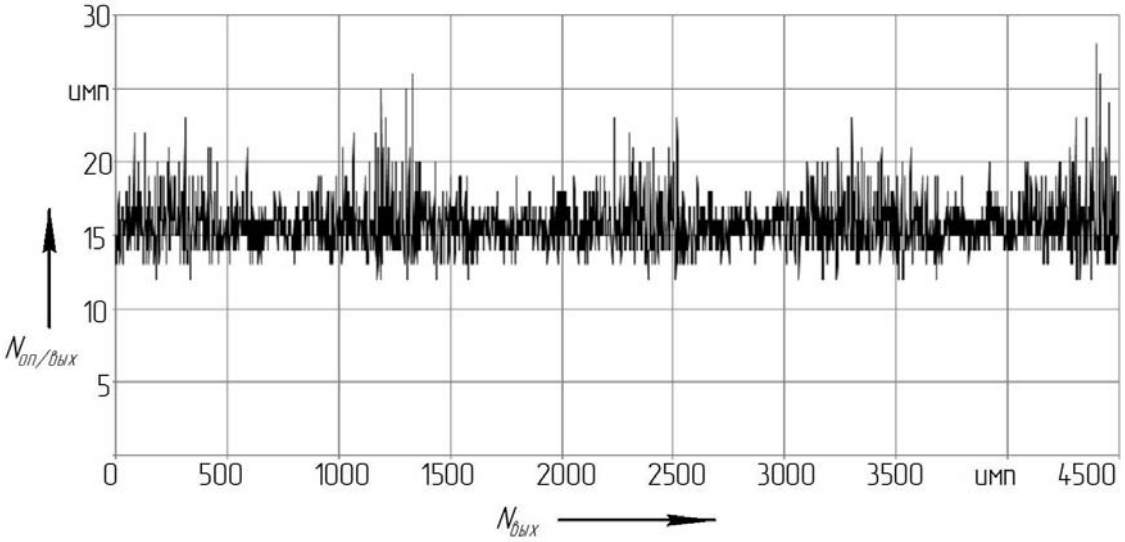


Рис. 8. Первичный диагностический сигнал при оценке состояния многоступенчатой передачи

Информативная способность этого сигнала невелика, хотя он свидетельствует об изменениях кинематической погрешности, если сравнивать с эталонным сигналом, снятым на новом приводе. Но, обрабатывая этот сигнал по алгоритму, описанному выражением (2), получаем график изменения кинематической погрешности двухступенчатого привода (рис. 9).

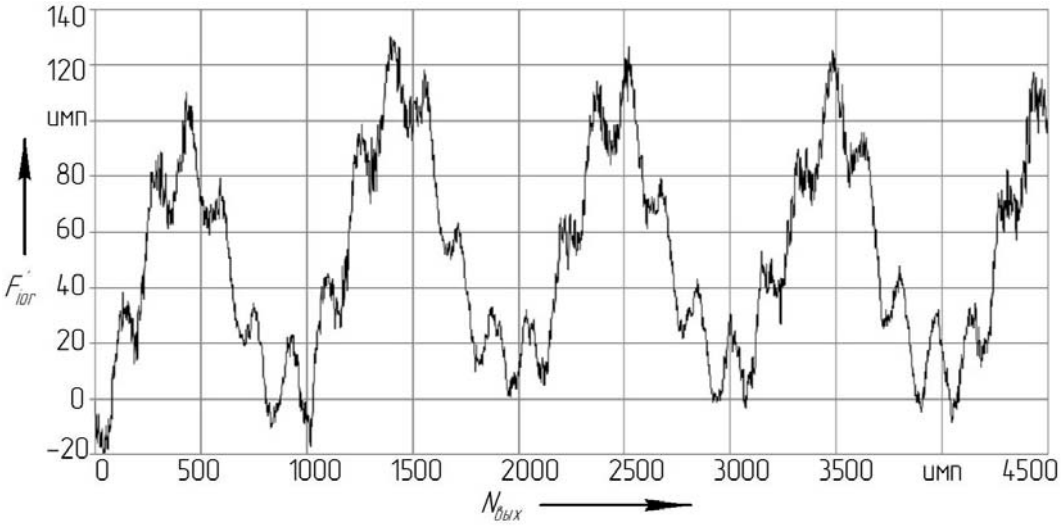


Рис. 9. График изменения кинематической погрешности двухступенчатого привода при U_2 = 6,4

На графике видны две гармонические составляющие кинематической погрешности передачи, наложенные друг на друга, – от шестерни входного вала размахом около 30 импульсов и выходного зубчатого колеса размахом около 140 импульсов. При этом видно, что за один оборот выходного зубчатого колеса (низкочастотные колебания) появляется 6,4 колебаний более высокой частоты, соответствующие 6,4 оборотам ведущей шестерни в приводе с передаточным числом 6,4.

Наибольшая величина кинематической погрешности одной зубчатой пары колес 8-й степени точности составляет 200 мкм. Если пересчитать импульсы на рис. 9 в линейные величины, то наибольшая величина кинематической погрешности для первой пары зубчатых колес составит 2300 мкм, для второй 2060 мкм, что более чем в 10 раз превышает допустимые по ГОСТу для новой исследуемой передачи. При анализе высокочастотных колебаний графика кинематической погрешности (см. рис. 9) обнаружены выбросы колебаний, которые идентифицированы как единичные дефекты (рис. 10). По шагу повторного проявления T_1 и T_2 определена принадлежность дефекта зубчатому колесу входного вала привода.

Величина дефекта определяется величиной выброса, составляющей 19 импульсов опорного сигнала, что соответствует размеру дефекта, равному трети толщины зуба по диаметру делительной окружности s. С учетом величины перекрытия передачи этот дефект соответствует выломанному зубу на ведущей шестерне привода.

Таким образом, имея возможность определения величины и местонахождения единичных дефектов зубьев и величины циклической погрешности каждой пары зубчатой передачи, можно более точно диагностировать зубчатые приводы, определяя опасность дефектов для дальнейшей эксплуатации и своевременного вывода их в ремонт.

Рис. 10. Фрагмент графика изменения кинематической погрешности передачи

Выводы

Предложенный метод определения единичных дефектов, их величины и месторасположения в кинематической цепи привода, а также циклической погрешности по анализу изменения кинематической погрешности передачи, определяемой путем отслеживания относительных угловых перемещений ведущего и ведомого валов привода импульсным способом, позволяет более точно оценивать техническое состояние не только зубчатой пары, но и более сложного привода. Поскольку максимальная величина единичного дефекта регламентирована нормативными документами, то предложенный способ диагностики зубчатых передач по анализу кинематической погрешности позволит проводить мониторинг технического состояния трансмиссий для своевременного ремонта и упреждения выхода из строя приводов машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методические рекомендации по проведению технического диагностирования грузоподъемных кранов с истекшим сроком службы. – Минск : БОИМ, 2006. – 328 с.

2. **Антипенко, Г. Л.** Моделирование единичных дефектов в зубчатых зацеплениях приводов машин / Г. Л. Антипенко, М. Г. Шамбалова // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2012. – № 2. – С. 6–16.

3. **Пат. 6802 BY, C 1 G 01 M 13/02.** Способ диагностирования зубчатых зацеплений механических передач / Г. Л. Антипенко [и др.]. – № a20020570 ; заявл. 02.07.02 ; опубл. 30.03.03. – 5 с. : ил.

Статья сдана в редакцию 16 мая 2016 года

Григорий Леонидович Антипенко, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-297-45-34-95.
Вероника Александровна Судакова, канд. техн. наук, Белорусско-Российский университет. E-mail: www.veronia111@yandex.ru.
Марина Григорьевна Шамбалова, инженер, ИООО «Эпам Системз». Тел.: +375-447-16-06-69.

Grigory Leonidovich Antipenko, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-297-45-34-95.
Veronika Aleksandrovna Sudakova, PhD (Engineering), Belarusian-Russian University. E-mail: www.veronia111@yandex.ru.
Marina Grigoryevna Shambalova, engineer, IOOO «Epam Systems». Phone: +375-447-16-06-69.

УДК 621.787

А. М. Довгалев, С. А. Сухоцкий

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКИМ УПРОЧНЕНИЕМ

UDC 621.787

A. M. Dovgalev, S. A. Sukhotsky

IMPROVEMENT OF PERFORMANCE OF FLAT WORKPIECE SURFACES BY USING MAGNETO-DYNAMIC HARDENING

Аннотация

В работе исследованы микротвердость и глубина упрочнения поверхностного слоя плоских деталей. Представлены результаты рентгеноструктурных исследований стальных образцов, упрочненных магнитно-динамическим накатыванием. Приведены сведения о триботехнических испытаниях, указывающих на снижение коэффициента трения и повышение износостойкости упрочненных плоских поверхностей.

Ключевые слова:

упрочнение, микротвердость, накатывание, инструмент, магнитная система, вращающееся магнитное поле, трение, износостойкость.

Abstract

The paper presents adaptive control systems to monitor the quality of machining of the surface layer of machine parts during the process of combined magneto-vibrodynamic strengthening. The smart adaptive control system is described which monitors the accuracy of dynamic size of a machine part aperture during combined machining by means of cutting (abrasive machining) and magneto-vibrodynamic rolling. The data on designs of controlled tools for the combined strengthening treatment by rotating magnetic field and magneto-vibrodynamic.

Key words:

adaptive system, accuracy control, quality of machining, magneto-dynamic roll forming, magnetic field, combined machining, controlled tool.

Введение

Повышение долговечности технических систем является важной задачей, выполняемой как на стадии их конструирования, так и при технологическом изготовлении входящих в них деталей.

Эксплуатационные свойства деталей машин, в том числе износостойкость, определяются качественными характеристиками их поверхностей, обеспечиваемыми на финишных отделочно-упрочняющих операциях технологического процесса.

Существенное повышение эксплуатационных свойств деталей обеспечивают статические и динамические методы поверхностного пластического деформирования (ППД). Однако известные методы ПДД в той или мере исчерпали свои технологические возможности. В связи с этим актуальной задачей является разработка новых методов отделочно-упрочняющей обработки, реализующих силовое взаимодействие деформирующих элементов с упрочняемой поверхностью детали на основе

© Довгалев А. М., Сухоцкий С. А., 2016

применения нетрадиционных видов энергии, например, магнитного поля.

Определенный интерес представляет разработанный авторами статьи способ магнитно-динамического накатывания, при котором упрочнение плоских поверхностей заготовок осуществляют двухрядным инструментом, содержащим приводные и деформирующие шары, взаимодействующие между собой посредством вращающегося магнитного поля [1].

В то же время в источниках литературы отсутствуют сведения о технологических возможностях разработанного способа, касающихся характеристик упрочнения поверхностного слоя заготовок и его эксплуатационных свойств.

В связи с этим выполнены исследования основных характеристик поверхностного слоя и проведены триботехнические испытания плоских поверхностей заготовок, упрочненных магнитно-динамическим накатыванием.

Исследование микротвердости упрочненного поверхностного слоя заготовок

В соответствии с поставленной задачей выполнены исследования микротвердости образцов, полученных из заготовок, плоские поверхности которых были обработаны по различным технологиям.

Исследовали три партии заготовок из стали 45 (200…220 HB) по 10 шт. в каждой. Рабочие поверхности всех заготовок предварительно обрабатывали методом торцового фрезерования. Затем поверхности заготовок первой партии шлифовали (*Ra* 0,40….0,35 мкм), а второй и третьей упрочняли магнитно-динамическим накатыванием инструментом с диаметром деформирующих шаров 12 и 15 мм соответственно и получали шероховатость *Ra* 0,50…0,40 мкм.

Для упрочняющей обработки использовали инструмент, содержащий корпус, кольцевые камеры и расположенные в них с возможностью взаимодействия между собой приводные и деформирующие шары, магнитную систему, включающую источник магнитного поля и магнитопроводы [2].

Магнитно-динамическое накатывание плоских поверхностей заготовок осуществляли на вертикально-фрезерном станке модели FSS-400 CNC на следующих режимах: частота вращения инструмента n = 940 мин$^{-1}$ (V = 375 м/мин); подача инструмента S = 125 мм/мин; натяг между деформирующими и приводными шарами инструмента h = 0,7 мм; количество рабочих ходов инструмента – один.

Из полученных заготовок вырезали образцы размером 10 × 10 × 10 мм, торцовые поверхности которых шлифовали, а затем полировали по стандартной методике [3].

Измерение микротвердости по глубине исследуемых образцов производили при помощи твердомера Indentec ZHV (Великобритания).

Определение микротвердости проводили по методике, в соответствии с которой на торцовую поверхность образца наносили отпечаток под действием статической нагрузки, приложенной к алмазному наконечнику прибора в течение определенного времени. К алмазному наконечнику прикладывали нагрузку 0,981 Н в течение 10 с. После удаления нагрузки измеряли диагонали полученного отпечатка [2, 4]. За величину микротвердости поверхности на исследуемой глубине образца принимали среднее значение пяти измерений параметра.

Результаты исследований микротвердости заготовок по глубине представлены на рис. 1.

Как видно из рис. 1, в поверхностном слое микротвердость заготовок первой партии изменяется в пределах 2300…2400, а заготовок второй и третьей – в диапазоне 2550…2950 МПа. При этом глубина упрочнения поверхностного слоя заготовок, обработанных маг-

нитно-динамическим накатыванием, составляет 650 мкм.

На рис. 2 представлена зависимость степени упрочнения заготовок по глубине (отношение микротвердости поверхностного слоя на соответствующей глубине заготовок, упрочненных магнитно-динамическим накатыванием, к микротвердости поверхности неупрочненных заготовок).

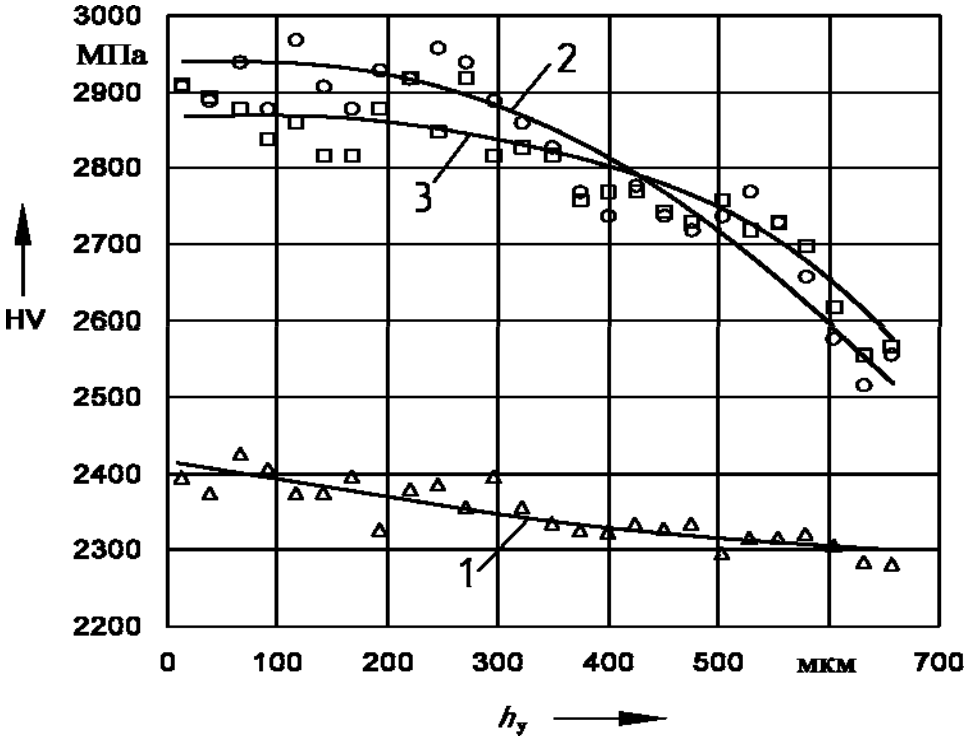


Рис. 1. Изменение микротвердости в поверхностном слое заготовок по глубине: 1, 2, 3 – заготовки первой, второй и третьей партий соответственно

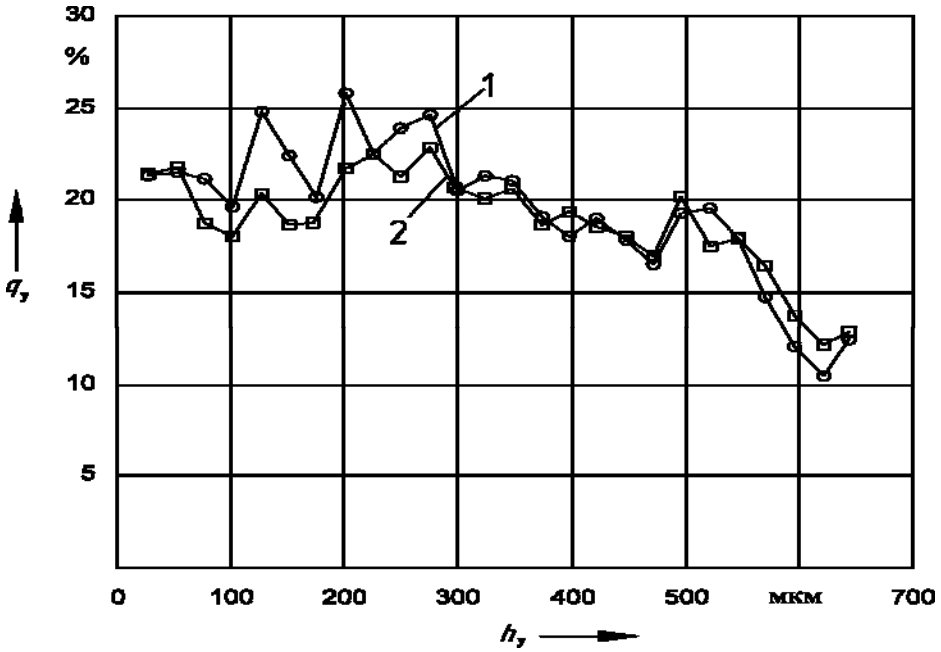


Рис. 2. Степень упрочнения поверхности заготовок по глубине: 1, 2 – упрочнение магнитно-динамическим накатыванием инструментом с диаметром деформирующих шаров 12 и 15 мм соответственно

Анализ результатов изменения микротвердости в поверхностном слое показал, что на глубине заготовок до 350 мкм упрочнение составляет 18…26 %, а на глубине 350…650 мкм – 11…20 %.

Рентгеноструктурные исследования поверхностного слоя упрочненных заготовок

Для оценки характеристик упрочненного поверхностного слоя заготовок (плотности дислокаций, остаточных напряжений сжатия, текстуры) образцов были выполнены рентгеноструктурные исследования.

Обрабатывали заготовки размером (L × B × H) 200 × 200 × 15 мм.

Группа I заготовок: материал – сталь 45 (200…220 HB):

а) вид механической обработки поверхности – шлифование (*Ra* 1,2…1,1 мкм);

б) вид механической обработки поверхности – шлифование и последующее магнитно-динамическое накатывание (*Ra* 0,28…0,22 мкм).

Группа II заготовок: материал – сталь 45 (41…44 HRC):

а) вид механической обработки поверхности – шлифование (*Ra* 1,10…1,05 мкм);

б) вид механической обработки поверхности – шлифование и последующее магнитно-динамическое накатывание (*Ra* 0,35…0,30 мкм).

Магнитно-динамическое накатывание осуществляли на следующих режимах: n = 800 мин$^{-1}$ (V = 320 м/мин); S = 125 мм/мин; число рабочих ходов инструмента – 1; охлаждение – масло индустриальное И-20; величина натяга между деформирующими и приводными шарами инструмента – 0,7 мм.

Из обработанных заготовок вырезали образцы размером 10 × 10 × 12 мм.

Исследования образцов проводили на автоматизированном рентгеновском комплексе на базе дифрактометра ДРОН-3М в CoKα-излучении с применением монохроматизации дифрагированного пучка. В качестве кристалла-монохроматора использовали пластину пиролитического графита. Для получения информации о структуре поверхностных слоев исследуемых образцов проводили запись дифракционных линий (110), (200), (211), (220) матричной α-Fe-фазы, расположенных в интервале углов рассеяния 2θ, равных 48…56, 74…80, 96…104, 120…128 град соответственно. Рентгеновская съемка выполнялась в режиме сканирования (по точкам) с шагом 0,1 град при продолжительности набора импульсов в 15 и 20 с при записи линий (110), (200) и (211), (220) соответственно. Период кристаллической решетки материала образцов, а также напряженное состояние их поверхностных слоев оценивали по результатам записи дифракционной линии (220).

Физическое уширение β исследуемых дифракционных отражений определяли методом аппроксимации [5]. При этом вводили поправки на геометрию съемки и неоднородность излучения.

Результаты проведенных исследований представлены в табл. 1 и 2.

Как видно из табл. 1, в образцах группы I после шлифования дифракционные линии матричной α-Fe-фазы β_{110}, β_{220} заметно уширены (по сравнению с эталонным образцом) и равны $6{,}25 \cdot 10^{-3}$ и $12{,}04 \cdot 10^{-3}$ рад соответственно. Последнее свидетельствует о достаточно высокой плотности дефектов кристаллической решетки. Период решетки α-фазы составляет a = 0,28662 нм. Вместе с тем, величина отношения β_{220}/β_{110} близка к величине отношения $\sec\theta_{220}/\sec\theta_{110}$, что свидетельствует о формировании в поверхностных слоях шлифованных образцов из стали 45 фрагментированных структур, которые характеризуются скоррелированным расположением дислокаций в виде стенок, образующих границы субзерен [6].

Табл. 1. Значения физического уширения дифракционных линий и периода решетки матричной α-фазы поверхностных слоев образцов

Группа образцов		Вид механической обработки поверхности	β_{110}, 10^{-3} рад	β_{220}, 10^{-3} рад	$\frac{\beta_{220}}{\beta_{110}}$	*a*, нм
I	а	Шлифование	6,25	12,04	1,93	0,28662
	б	Шлифование + МДН	6,92	14,33	2,07	0,28676
II	а	Шлифование	9,52	26,03	2,73	0,28661
	б	Шлифование + МДН	14,61	31,55	2,16	0,28674
Примечание – $tg\theta_{220}/tg\theta_{110} = 3,82$; $sec\theta_{220}/sec\theta_{110} = 1,91$						

Табл. 2. Распределение интенсивности в дифракционных линиях

Группа образцов		Дифракционная линия			
		110	200	211	220
I	а	1,00	0,15	0,37	0,19
	б	1,00	0,11	0,70	0,20
II	а	1,00	0,15	0,45	0,17
	б	1,00	0,10	0,65	0,20

Магнитно-динамическая упрочняющая обработка поверхности шлифованных образцов группы I сопровождается повышением плотности дефектов кристаллической решетки в поверхностном слое, что следует из регистрируемого уширения дифракционных линий матричного α-твердого раствора. Согласно значениям соотношения β_{220}/β_{110} для упрочненных образцов из стали 45 (200…220 HB), магнитно-динамическое накатывание существенно не изменяет структуру их поверхностных слоев. Период кристаллической решетки матричной α-фазы в упрочненной магнитно-динамическим накатыванием поверхности заметно возрастает и составляет a = 0,28676 нм (для эталонного образца из стали a = 0,28664 [7]).

Анализ образцов группы II показывает, что после их закалки и последующего шлифования дифракционные линии матричной α-фазы заметно уширены (β_{110}, β_{220} соответственно равны $9,52 \cdot 10^{-3}$ и $26,03 \cdot 10^{-3}$ рад). Это указывает на относительно высокую плотность дефектов кристаллической решетки. Последующее упрочнение шлифованных образцов из стали 45 (41…44 HRC) магнитно-динамическим накатыванием приводит к увеличению плотности дефектов кристаллической решетки, о чем свидетельствует возрастание β до $14,61 \cdot 10^{-3}$ рад для линии (110) и $31,55 \cdot 10^{-3}$ рад для линии (220).

Из сравнительного анализа полученных данных (см. табл. 2) следует, что магнитно-динамическое накатывание поверхности образцов из стали 45 приводит к формированию текстуры, на что указывает повышение интенсивности дифракционной линии (211).

После магнитно-динамического накатывания в поверхностном слое образцов первой и второй партий присутствовали остаточные напряжения сжатия величиной 190 и 185 МПа соответственно, определенные по [7].

Триботехнические исследования упрочненных плоских поверхностей заготовок

В ходе сравнительных испытаний определяли износостойкость плоских поверхностей заготовок, обработанных по различным технологиям.

Материал исследуемых заготовок:

– первая и вторая партии – сталь 45 (200…220 HB) ГОСТ 1050-88;

– третья и четвертая партии – сталь 45 (41…44 HRC) ГОСТ 1050-88.

Технология получения рабочей поверхности исследуемых заготовок:

– первая партия: торцовое фрезерование с последующим шлифованием (*Ra* 0,82…0,80 мкм);

– вторая партия: торцовое фрезерование с последующим магнитно-динамическим накатыванием (n = 800 мин$^{-1}$ (V = 320 м/мин), S = 125 мм/мин, h = 0,7 мм), *Ra* 0,46…0,42 мкм;

– третья партия: торцовое фрезерование, термическая обработка, шлифование (*Ra* 0,75…0,72 мкм);

– четвертая партия: торцовое фрезерование, термическая обработка, магнитно-динамическое накатывание (n = 800 мин$^{-1}$ (V = 320 м/мин), S = 125 мм/мин, h = 0,7 мм), *Ra* 0,52…0,5 мкм.

Из полученных заготовок подготавливали призматические образцы с размерами 6 × 10 × 7 мм в количестве 10 шт. для каждой партии.

Триботехнические испытания исследуемых образцов проводили на трибометре АТВП, оснащенном устройством для измерения коэффициента трения, обеспечивающим возвратно-поступательное движение контактирующих тел при средней скорости взаимного перемещения 0,1 м/с. Сравнительные испытания триботехнических свойств образцов проводили в режиме трения при давлении 10 МПа с использованием масла индустриального И-20. В качестве контртела использовали пластину из закаленной стали У8 (800 HV10) с размерами 5 × 40 ×90 мм.

Измерение величины массового износа призматических образцов осуществляли весовым методом с использованием аналитических весов АДВ-200М. Погрешность измерения массы образца составляла 0,05 мг. С поверхности образцов перед взвешиванием тщательно удалялись продукты изнашивания, затем образцы промывались, протирались спиртом и просушивались. После просушивания взвешивание каждого образца осуществляли 5 раз. Образцы взвешивали до начала испытаний и после достижения 20000 циклов возвратно-поступательного движения. Общий путь трения составлял 1200 м.

Величину линейного износа образцов при трении в среде смазочного материала определяли методом искусственных баз, основанным на сравнении глубин отпечатков алмазной пирамидки в образцах до и после изнашивания. Отпечатки на поверхности образцов изделия получали путем вдавливания индентора (нагрузка P = 98 Н) в виде пирамидки с квадратным основанием и углом при вершине между противолежащими гранями $\alpha = 136^{\circ}$. Нижняя точка положения отпечатка от индентора в исследуемом образце являлась искусственной базой, от которой измеряли расстояние до поверхности трения. Глубину расположения отпечатка от вдавливания индентора в исследуемый образец вычисляли по [8].

Отпечатки на поверхность исследуемых образцов наносили вдавливанием индентора с помощью прибора DuraScan 20, предназначенного для определения твердости деталей по Виккерсу.

Результаты триботехнических исследований представлены в табл. 3 и на рис. 3…6.

Табл. 3. Значения коэффициента трения и интенсивности массового I_q и линейного I_h изнашивания образцов, обработанных по различным технологиям

Материал и способ получения поверхности образца	Коэффициент трения f	Интенсивность массового изнашивания I_q, 10^{-3} мг/м	Интенсивность линейного изнашивания I_h, 10^{-3} мкм/м
Сталь 45 (200…220 HB), фрезерование + шлифование	0,116	0,47	23,0
Сталь 45 (200…220 HB), фрезерование + МДН	0,104	0,20	11,7
Сталь 45 (41…44 HRC), фрезерование + ТО + шлифование	0,131	0,45	21,0
Сталь 45 (41…44 HRC), фрезерование + ТО + МДН	0,109	0,12	6,8

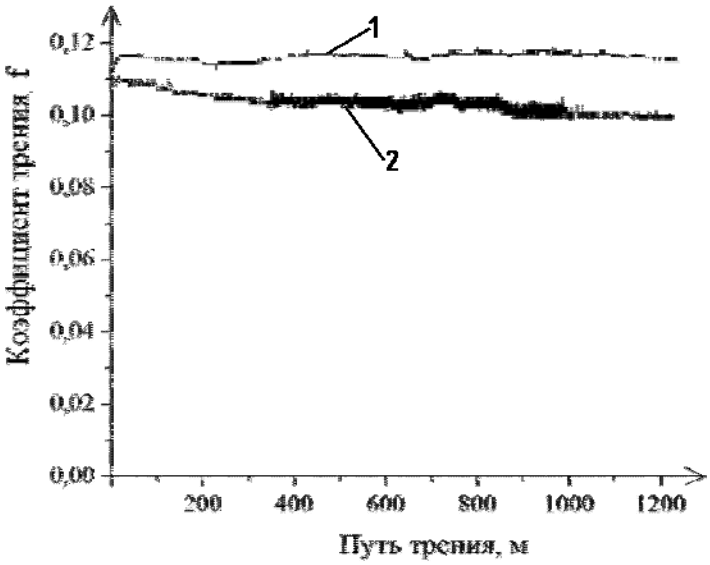


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения рабочей поверхности образцов из стали 45 (200…220 HB) от пути трения: 1 – фрезерование + шлифование; 2 – фрезерование + МДН

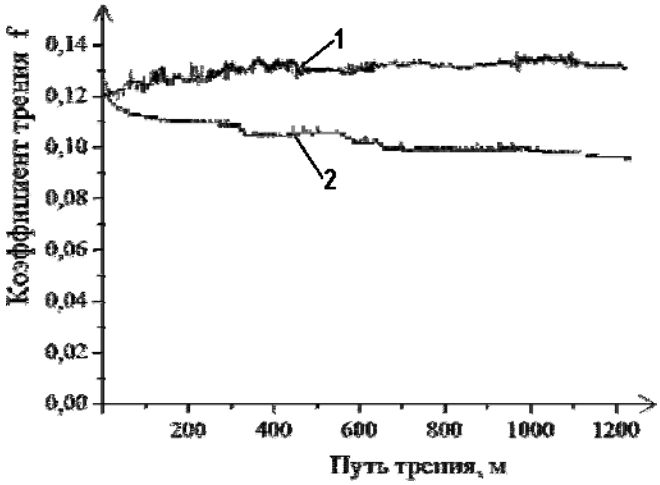


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения рабочей поверхности образцов из стали 45 (41…44 HRC) от пути трения: 1 – фрезерование +ТО + шлифование; 2 – фрезерование + ТО + МДН

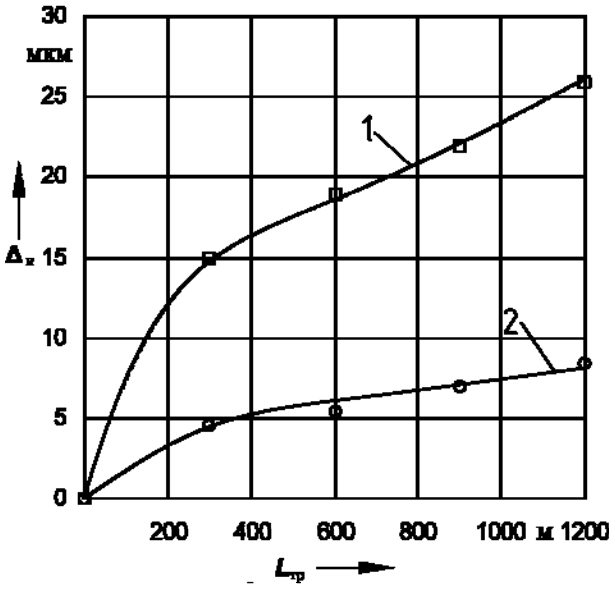


Рис. 5. Зависимость линейного износа $\Delta_и$ образцов из стали 45 (200…220 HB) от пути трения $L_{тр}$: 1 – фрезерование + шлифование; 2 – фрезерование + МДН

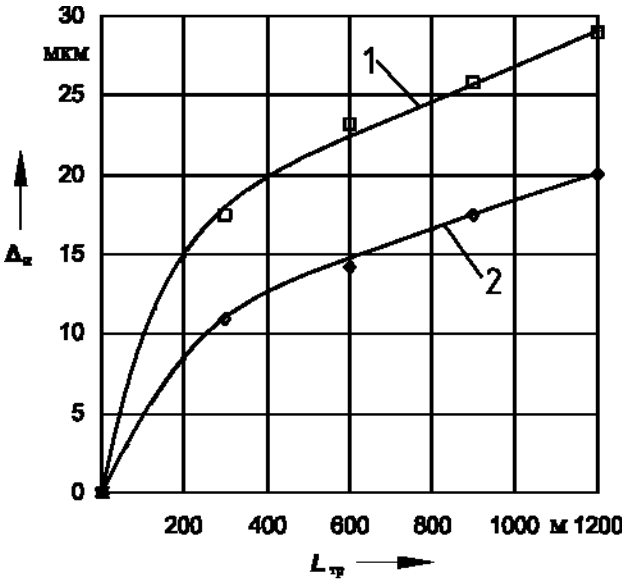


Рис. 6. Зависимость линейного износа $\Delta_и$ образцов из стали 45 (41…44 HRC) от пути трения $L_{тр}$: 1 – фрезерование + ТО + шлифование; 2 – фрезерование + ТО + МДН

Исследование износостойкости показало, что интенсивность линейного изнашивания образцов из стали 45 (200…220 HB), рабочие поверхности которых получены фрезерованием и последующим шлифованием, составила 23 мкм, а обработанных фрезерованием и последующим магнитно-динамическим накатыванием – 11,7 мкм. При этом коэффициент трения поверхностей заготовок, полученных шлифованием, составил 0,116, а упрочненных магнитно-динамическим накатыванием – 0,104.

Таким образом, магнитно-динамическое накатывание (по отношению к шлифованию) позволяет снизить коэффициент трения поверхностей заготовок на 11,5 % и повысить их износостой-

кость в 2,2 раза.

Исследования показали, что интенсивность линейного изнашивания образцов из стали 45 (41…44 HRC), рабочие поверхности которых получены фрезерованием и последующим шлифованием, составляет 21 мкм, а обработанных фрезерованием и последующим магнитно-динамическим накатыванием – 6,8 мкм. При этом коэффициент трения поверхностей заготовок, обработанных шлифованием, составляет 0,131, а упрочненных магнитно-динамическим накатыванием – 0,109. Следовательно, магнитно-динамическое накатывание поверхностей заготовок из стали 45 (41…44 HRC) снижает их коэффициент трения на 20 % и повышает износостойкость в 3,1 раза.

Заключение

Установлено, что магнитно-динамическое накатывание плоских поверхностей заготовок обеспечивает достижение следующих характеристик качества: повышение микротвердости поверхностного слоя на 11…26 %; упрочнение поверхности на глубину до 650 мкм; повышение плотности дефектов кристаллической решетки деформированного металла и формирование в упрочненном слое образцов остаточных напряжений сжатия величиной 185…190 МПа; уменьшение коэффициента трения поверхностей на 12…20 % и повышение их износостойкости в 2,2…3,1 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструмент и способ магнитно-динамического упрочнения плоской поверхности детали : пат. 17545 РБ, МПК B 24 B 39/02 / А. М. Довгалев, С. А. Сухоцкий; заявитель Белорус.-Рос. ун-т. – № a 20111278 ; заявл. 03.10.11; опубл. 30.10.13 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 3. – 4 с.

2. Математическое моделирование магнитно-динамического инструмента для упрочняющей обработки плоских поверхностей / А. М. Довгалев, Н. А. Леванович, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2010. – № 4. – С. 55–65.

3. **Григорович, В. К.** Твердость и микротвердость металлов / В. К. Григорович. – М. : Наука, 1976. – 230 с.

4. **ГОСТ 9450-76.** Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. – М. : Изд-во стандартов, 1993. – 34 с.

5. **Лысак, Л. И.** Определение истинной ширины рентгеновских интерференционных линий с применением стандартного образца / Л. И. Лысак // Вопросы физики металлов и металловедения : сб. тр. – Киев, 1955. – № 6. – С. 40–53.

6. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Я. С. Уманский [и др.]. – М. : Металлургия, 1982. – 632 с.

7. **Белый, И. В.** Справочник по магнитоимпульсной обработке металлов / И. В. Белый, С. М. Фертик, Л. Т. Хименко. – Харьков : Вища шк., 1977. – 320 с.

8. **ГОСТ 9450-76.** Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 1993. – 34 с.

Статья сдана в редакцию 26 марта 2016 года

Александр Михайлович Довгалев, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. E-mail: ret@bru.by.
Сергей Александрович Сухоцкий, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет. E-mail: darvin_serg@mail.ru.

Aleksandr Mikhailovich Dovgalev, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. E-mail: ret@bru.by.
Sergey Aleksandrovich Sukhotsky, senior lecturer, Belarusian-Russian University. E-mail: darvin_serg@mail.ru.

УДК 62-531.7

М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, В. Л. Габец, Д. А. Ямная

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ КОНТАКТИРОВАНИЯ РАСПИЛИВАЕМОЙ ЗАГОТОВКИ, СОВЕРШАЮЩЕЙ ЦИРКУЛЯЦИОННОЕ ДВИЖЕНИЕ С БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ОТРЕЗНОГО ДИСКА

UDC62-531.7

M. G. Kiselev, A. V. Drozdov, V. L. Gabets, D. A. Yamnaya

MATHEMATICAL AND PHYSICAL MODELING OF INTERACTION OF A CIRCULATING SAWED WORKPIECE WITH A LATERAL SURFACE OF A CUTOFF DISK

Аннотация

Статья посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию условий взаимодействия распиливаемой заготовки с боковой поверхностью отрезного диска. Предложена математическая модель для описания формы траектории, оставляемой точкой, принадлежащей заготовке на боковой поверхности распиловочного диска, в процессе циркуляционного распиливания. Приводится описание методики физического моделирования процесса взаимодействия распиливаемой заготовки, совершающей циркуляционное движение, с боковой поверхностью отрезного диска. Теоретически установлена и экспериментально подтверждена возможность управления условиями относительного скольжения заготовки и режущего инструмента за счет изменения частоты возбуждения колебательной системы модернизированной распиловочной секции.

Ключевые слова:

распиловочный диск, математическое и физическое моделирование, циркуляционное движение.

Abstract

The purpose of the paper is the theoretical and experimental research of interaction of a cutoff disk lateral surface with a workpiece which is being sawed up. The mathematical model is offered which describes the trajectory form on the cutoff disk lateral surface made by a point of the workpiece, moving in circulating motion in an elliptic trajectory. The technique for physical modeling of the interaction of a moving sawed-up workpiece with a lateral surface of a cutoff disk is described. Thus, the opportunity to control the conditions of relative sliding of the workpiece and the cutting tool due to changing the excitation frequency of a vibrating system of the modernized sawing unit was theoretically established and experimentally confirmed.

Key words:

sawing disc, mathematical and physical modeling, circulating motion.

Введение

Операция механического распиливания исходного сырья из твердых и сверхтвердых неметаллических материалов на штучные заготовки широко используется в технологии оптического и электронного приборостроения, а также в ювелирном производстве. К операции распиливания предъявляются следующие основные требования: высокая производительность выполнения, минимально возможная для данной технологической схемы толщина распила, а также высокие геометрическая точность и качество распиленной поверхности штучной заготовки. Последние два тре-

© Киселев М. Г., Дроздов А. В., Габец В. Л., Ямная Д. А., 2016

бования имеют принципиально важное значение при распиливании исходных заготовок из дорогостоящего сырья и продиктованы условием минимизации его безвозвратных потерь как на данной операции, так и на последующей операции шлифования полученных после распиливания поверхностей штучных заготовок.

С точки зрения уровня обеспечения этих требований, трудоемкости и сложности выполнения данной операции на первом месте стоит операция механического распиливания монокристаллов алмаза. Объясняется это его уникальной твердостью, высоким уровнем требований по минимизации безвозвратных потерь дорогостоящего сырья. В частности, это обеспечение минимальной толщины распила и высокое качество поверхности площадок распиленных полуфабрикатов [1].

По сравнению с лазерным разделением монокристаллов алмаза их механическое распиливание обеспечивает более высокий процент выхода годного сырья, особенно при обработке крупных кристаллов. Вместе с тем, он имеет недостатки, связанные с низкой производительностью процесса и недостаточно высоким качеством поверхности площадок распиленных полуфабрикатов, снижающим процент выхода годного сырья.

Одно из направлений повышения производительности и качества операции механического распиливания твердых и сверхтвердых материалов – это сообщение заготовке в процессе ее обработки двухмерного периодического циркуляционного движения [2–5]. Для осуществления такого способа распивания авторами была произведена модернизация промышленной распиловочной секции станка модели ШП-2, принципиальная схема которой представлена на рис. 1.

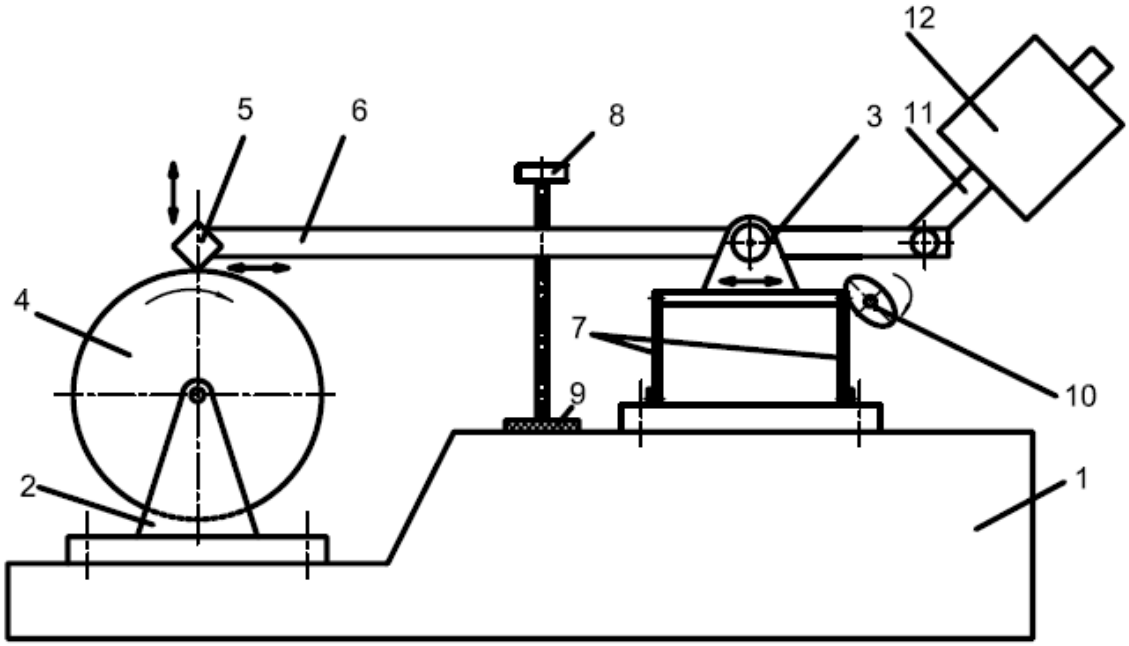


Рис. 1. Принципиальная схема распиловочной секции, обеспечивающей периодическое циркуляционное движение заготовки

На станине 1 установлены передняя 2 и задняя 3 пары стоек. В передней паре стоек 2 вращается распиловочный диск 4. Кристалл 5 закрепляется на

стреле 6, установленной в задней паре стоек 3, которые связаны со станиной с помощью пары плоских пружин 7, образующих параллелограмный подвес, допускающий перемещение стоек 3 вдоль горизонтали. Стрела поддерживается в рабочем положении регулировочным винтом 8, опирающимся на упругую прокладку 9. Перемещение стоек 3 обеспечивается кулачком 10, закрепленным на выходном валу привода (на чертеже не показан). Для создания рабочего давления на кристалл 5 на стреле 6 с помощью качающегося рычага 11 установлен регулируемый противовес 12.

При вращении кулачка 11 заготовка совершает колебательное движение в горизонтальном направлении. Одновременно в силу того, что центр тяжести противовеса 12 расположен выше оси качания стрелы 6, инерционные силы, действующие на него, создают переменный вращающий момент, вызывающий колебательные смещения заготовки по дуге окружности. В результате заготовка совершает двухмерное компланарное периодическое движение по замкнутой траектории [5], вид и параметры которой зависят от упругоинерционных характеристик колебательной системы и условий ее возбуждения. Однако для комплексного обоснования разработанного способа важно оценить влияние такого движения заготовки на качество распиливаемой поверхности, которое во многом определяется степенью проявления полирующего эффекта, возникающего при взаимодействии распиленных участков заготовки с боковыми сторонами распиловочного диска. С целью косвенной оценки степени проявления полирующего эффекта важно установить влияние параметров циркуляционного движения на форму траектории, описываемой участками перемещающейся по циркуляционной траектории заготовки на боковой поверхности распиловочного диска. В свою очередь, это позволит определить условия формирования микрорельефа на распиленной поверхности.

Математическое моделирование траектории перемещения точки на боковой поверхности распиловочного диска

Для определения траектории, оставляемой точкой, принадлежащей заготовке (для упрощения расчетов разместим точку в центре заготовки), составим уравнение координат точек окружности, моделирующей торцевую поверхность распиловочного диска согласно уравнениям

$$x_i = R\cos(\varphi_i) + X_0;$$

$$y_i = R\sin(\varphi_i) + Y_0,$$

где x_i, y_i – координаты точки окружности; X_0, Y_0 – координаты центра окружности; R – радиус окружности, R = 38 мм; φ_i – угол между радиус-вектором, проведенным к точке с координатами x_i, y_i и положительным направлением оси OY. В расчетах количество i точек принималось равным 360. Траекторию перемещения заготовки по эллиптической траектории с размерами большой и малой полуосей, равными соответственно w и h, с центром в начале координат можно представить в виде точек, координаты которых выражаются как

$$\begin{cases} x'_j = w\cos\eta_j; \\ y'_j = h\sin\eta_j, \end{cases}$$

где η_j – угол между радиус-вектором, проведенным к j-й точке на эллиптической траектории с координатами x'_j, y'_j, и положительным направлением оси OY; в расчетах j находилось в пределах от 0 до 360.

В случае наклона эллиптической траектории движения абразивной частицы под углом μ к положительному направлению оси OX каждую точку с координатами x'_j, y'_j необходимо пере-

множить на матрицу направляющих косинусов, соответствующую повороту на угол μ:

$$\begin{pmatrix} \cos\mu & \sin\mu \\ -\sin\mu & \cos\mu \end{pmatrix}.$$

В результате система, согласно [6], преобразуется к виду

$$\begin{cases} x'_j = w\cos\eta_j\cos\mu - h\sin\eta_j\sin\mu; \\ y'_j = w\cos\eta_j\sin\mu + h\sin\eta_j\cos\mu. \end{cases}$$

Движение заготовки по эллиптической траектории можно заменить движением центра круга по этой же траектории, т. е. координаты точек фигуры получаемой при данной операции будут выражаться как

$$x_i = R\cos(\varphi_i) + w\cos\eta_j\cos\mu - \\ - h\sin\eta_j\sin\mu;$$

$$y_i = R\sin(\varphi_i) + w\cos\eta_j\sin\mu + \\ + h\sin\eta_j\cos\mu, \qquad (1)$$

В случае, если приравнять индексы $i = j$ (т. е. каждая точка эллиптической траектории центра диска соединяется с единственной точкой окружности, моделирующей торцевую поверхность режущего инструмента (рис. 2)), то можно сформировать траектории движения центра заготовки по боковой поверхности режущего инструмента в условиях равенства частот вращения диска и заготовки. Вид данной траектории показан на рис. 2 жирной линией.

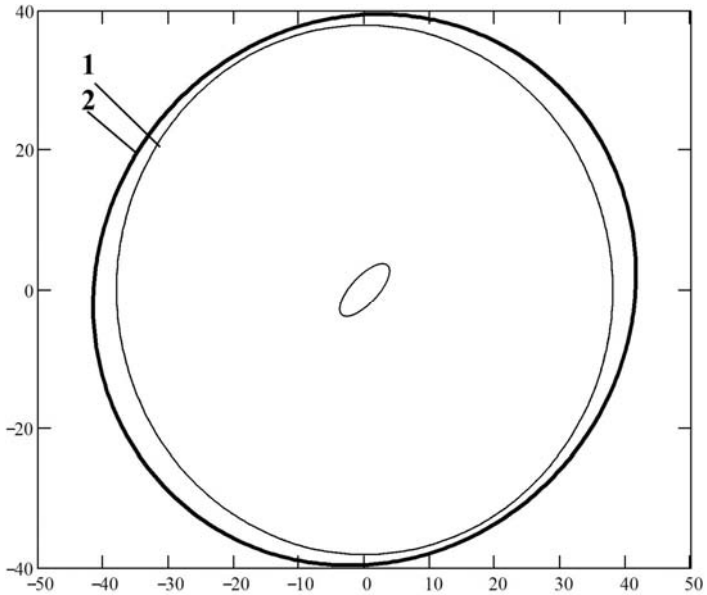


Рис. 2. Форма траектории перемещения точки, принадлежащей заготовке относительно боковых поверхностей распиловочного диска: 1 – окружность, моделирующая режущий инструмент, а также эллиптическая траектория (μ = 45) перемещения его центра, соответствующая циркуляционному движению заготовки; 2 – результирующая траектория перемещения, описываемая уравнениями (1)

В случае выполнения равенства $j = 2i$ координаты каждой точки эллиптической траектории центра диска складываются с координатами двух точек окружности, моделирующей торцевую поверхность режущего инструмента. В данном случае можно определить траекторию движения центра заготовки по боковой поверхности режущего инструмента в условиях, когда последний вращается с частотой, в 2 раза превышающей частоту эллиптического перемещения заготовки (рис. 3, а). Чтобы определить форму траектории при других соот-

ношениях частот вращения режущего инструмента и перемещения заготовки по циркуляционной траектории свяжем индексы друг с другом путем ввода искусственного индекса q, принимающего целочисленные значения:

$$i = S1 \cdot q;$$

$$j = S2 \cdot q,$$

где отношение безразмерных коэффициентов $S1/S2 = n_д / n_з$ представляет собой отношение простых целых чисел, эквивалентное отношению частот вращения диска $n_д$ и заготовки $n_з$. Так, формы траектории, формируемые при различных значениях $S1$ и $S2$, приведены на рис. 3.

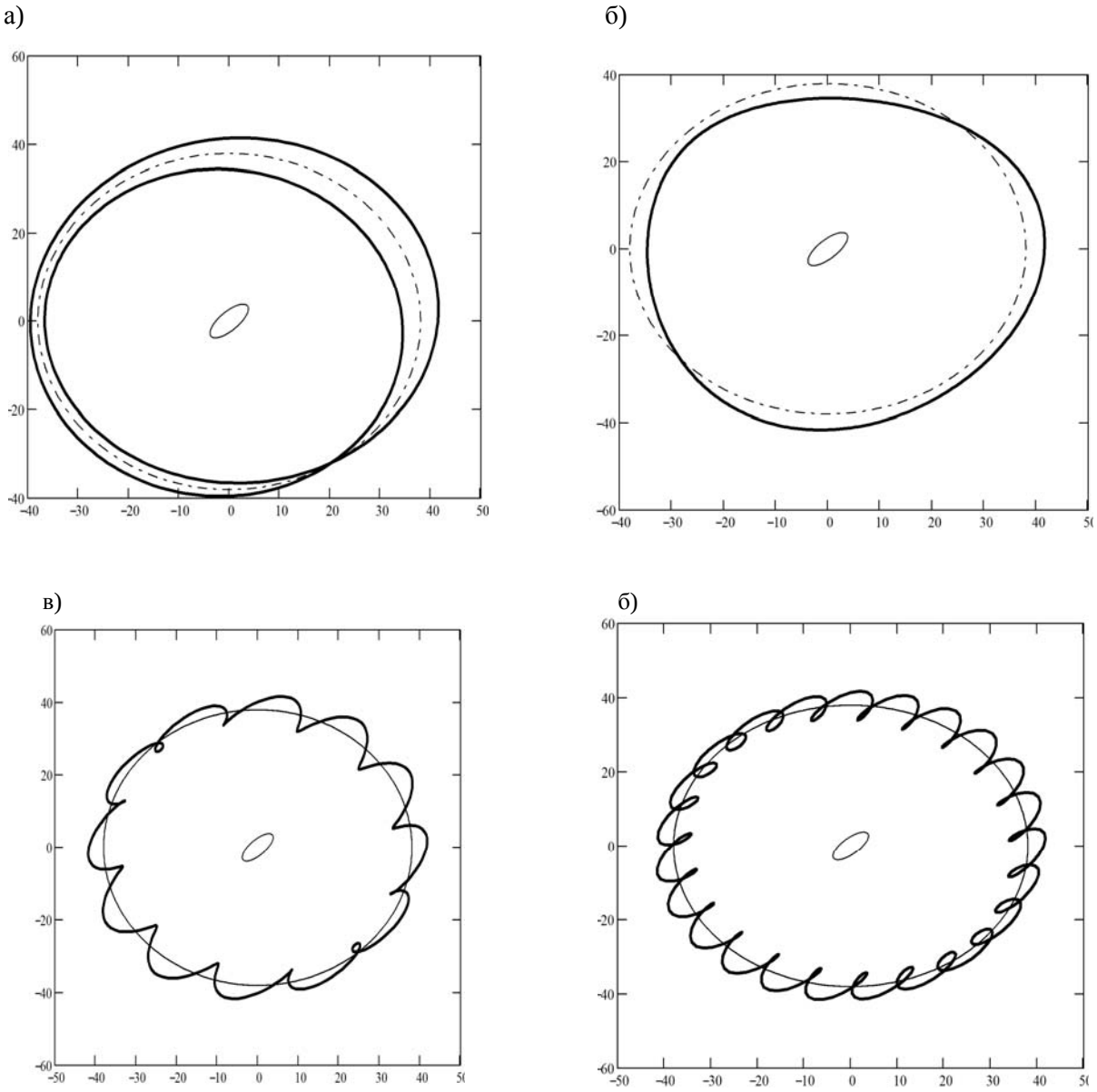


Рис. 3. Формы траектории точки, принадлежащей заготовке, оставляемой на боковой поверхности распиловочного диска, для различных соотношений частоты вращения режущего инструмента и частоты перемещения заготовки по эллиптической траектории: а – $n_д / n_з = 2$; б – $n_д / n_з = 0{,}5$; в – $n_д / n_з = 0{,}077$; г – $n_д / n_з = 0{,}042$

Как уже отмечалось, циркуляционное движение заготовки приводит к изменению кинематики относительного скольжения ее пропиленных участков с боковыми поверхностями диска. Наличие вертикальной составляющей этого движения обеспечивает реализацию условия неповторяемости следов обработки на распиленной поверхности заготовки, что способствует снижению по сравнению с обработкой в обычных условиях ее шероховатости. При этом предложенная математическая модель позволяет определить форму траектории, оставляемой точкой, принадлежащей заготовке на боковой поверхности распиловочного диска, при различных соотношениях частот вращения инструмента и перемещения заготовки по циркуляционной траектории, а также при различных ее геометрических параметрах (размере малой и большой полуосей, угле наклона последней к горизонтали). Последующий анализ формы данной кривой дает возможность прогнозировать изменение кинематики относительного скольжения пропиленных участков заготовки и боковых поверхностей диска, что позволяет дать оценку качества распиленной поверхности для различных технологических условий обработки.

Физическое моделирование процесса формирования траектории движения точки, принадлежащей заготовке, на боковой поверхности вращающегося диска

Для подтверждения результатов математического моделирования была проведена серия экспериментов, основанная на визуализации траектории движения точки, принадлежащей заготовке, относительно вращающегося диска.

Методика проведения этих экспериментов заключалась в следующем. На боковой поверхности отрезного диска 4 закреплялся бумажный диск 1 (рис. 4), выполняющий роль носителя информации.

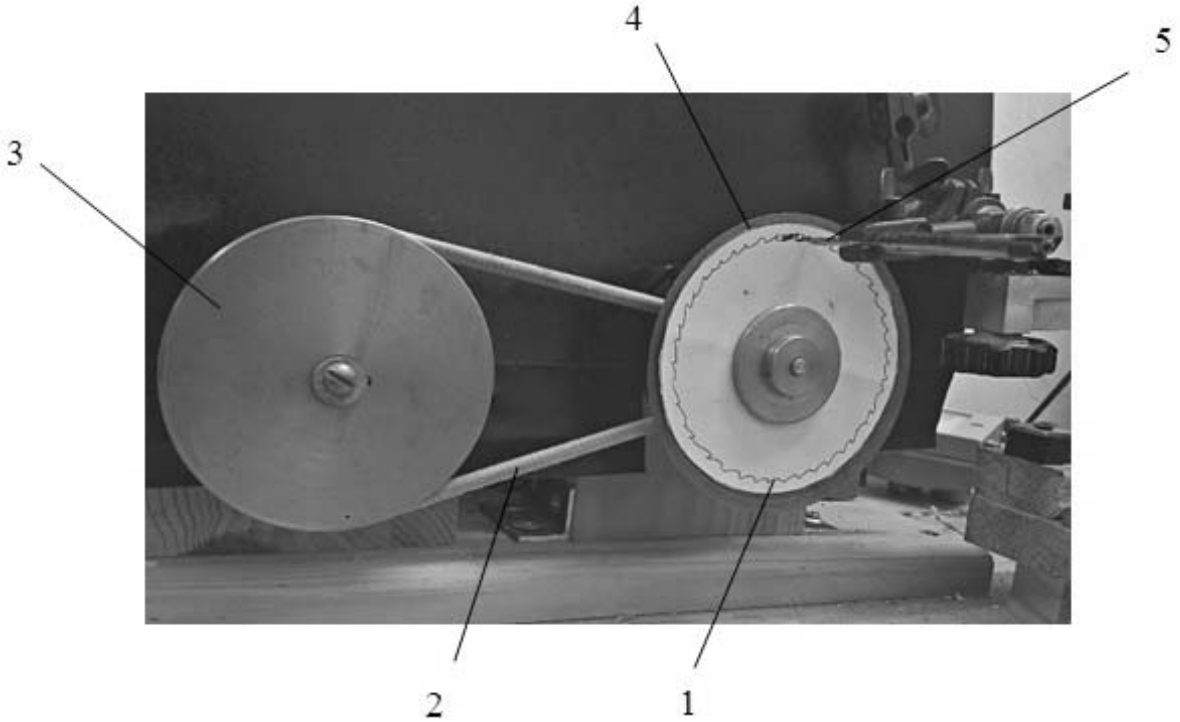


Рис. 4. Фотография узла регистрации траектории движения точки, принадлежащей заготовке, на поверхности вращающегося диска

На стреле в месте крепления оправки с образцом устанавливался стержень от гелиевой ручки 5, который с небольшим усилием прижимался к поверхности бумажного диска. Для обеспечения низкой частоты вращения последнего использовался отдельный шаговый электродвигатель (на рисунке он не виден), на валу которого закреплялся шкив 3. Вращение последнего передавалось на свободно вращающийся вал неработающего электродвигателя посредством ременной передачи 2. Частота вращения диска с бумажным носителем регулировалась за счет изменения частоты вращения вала шагового электродвигателя.

На рис. 5 представлены примеры записи траекторий движения точки, принадлежащей заготовке, на поверхности вращающегося диска при различной частоте возбуждения колебательной системы модернизированной распиловочной секции. Траектории имеют схожую форму с траекториями, полученными по результатам математического моделирования (см. рис. 3), что подтверждает адекватность приведенной выше модели.

Анализ этих траекторий показывает, что с возбуждением колебательной системы траектория движения точки приобретает пилообразный вид с четко выраженным периодическим характером изменения ее параметров. В частности (рис. 6), к ним относятся величина размаха вертикальных (радиальных) смещений $2Ав$, значение шага между выступами S и угол наклона β линии, соединяющей вершины соседних впадин и выступов (точки A и B), и касательной к описанной окружности, проведенной в точке B.

а) б) в)

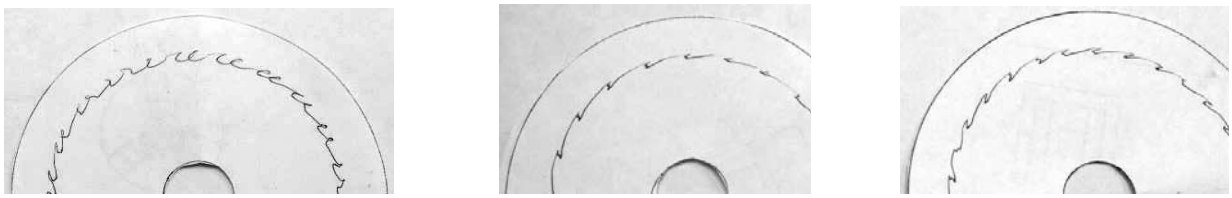


Рис. 5. Траектории движения точки, принадлежащей заготовке, на поверхности вращающегося диска (n = 10 мин$^{-1}$) при различной частоте f возбуждения колебательной системы модернизированной распиловочной секции за один оборот диска: а – f = 4 Гц; б – f = 2,8 Гц; 3 – f = 2 Гц

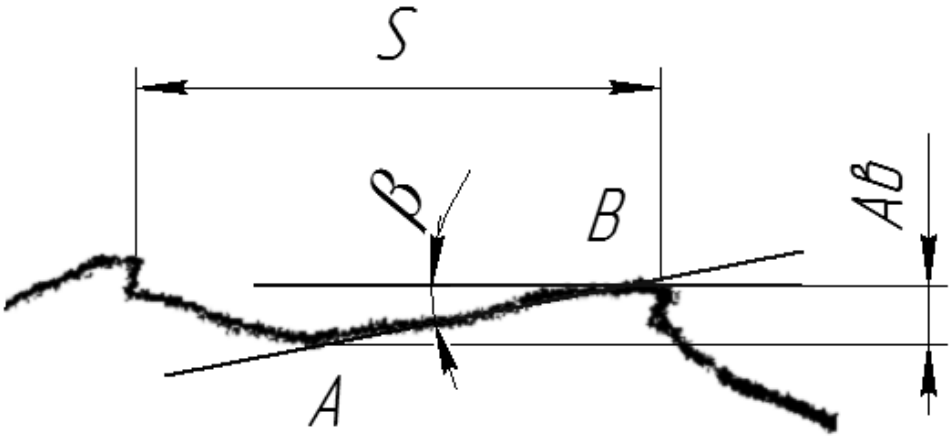


Рис. 6. Увеличенный фрагмент траектории движения точки, принадлежащей заготовке, с указанием характеризующих ее параметров

Из полученных экспериментальных данных следует, что с увеличением частоты возбуждения колебательной системы величина *Ав* и значение угла β возрастают, а величина *S* снижается. Связано это с тем, что, как было установлено ранее, с повышением *f* изменяются параметры эллиптической траектории: увеличиваются размеры малой и большой осей эллипса, происходит поворот последней в сторону вертикальной оси. Одновременно происходит уменьшение периода циркуляционного движения точки по эллиптической траектории, что сопровождается возрастанием средней за это время скорости ее перемещения по ней.

Влияние частоты вращения диска на траекторию движения точки, принадлежащей заготовке, при неизменной частоте возбуждения колебательной системы, равной 4 Гц, отражают данные, представленные на рис. 7.

Рис. 7. Траектории движения точки, принадлежащей заготовке, на поверхности диска при различной частоте его вращения *n* и неизменной частоте возбуждения колебательной системы, равной 4 Гц: а – n = 8 мин$^{-1}$; б – n = 10 мин$^{-1}$; в – n = 12 мин$^{-1}$

Согласно данным, с повышением *n* происходит увеличение параметра *S* траектории движения точки с одновременным уменьшением угла β при почти постоянной величине 2*Ав*. В результате в сторону уменьшения изменяется отношение пути, проходимого точкой в единицу времени на поверхности вращающегося диска в вертикальном (радиальном) направлении, к пути, проходимому в горизонтальном направлении, т. е. в направлении вектора окружной скорости вращения диска.

Таким образом, установлено, что за счет изменения частоты возбуждения колебательной системы (а соответственно, и параметров эллиптической траектории движения заготовки) и частоты вращения отрезного диска можно управлять условиями их скольжения, в частности, значением размаха 2*Ав* вертикальных смещений, шагом выступов *S* и величиной угла β. В свою очередь, это позволяет влиять на условия формирования микрорельефа на поверхности пропиленных участков заготовки. Как уже отмечалось, наличие вертикально направленных относительных колебательных смещений заготовки и боковой поверхности диска обеспечивает условие неповторяемости следов обработки, что должно положительно сказываться на снижении шероховатости распиленной поверхности заготовки.

Физическое моделирование процесса истирания пропиленных участков заготовки с боковыми поверхностями диска

Для экспериментального подтверждения этого положения была проведена серия экспериментов по физическому моделированию процесса взаимодействия (истирания) пропиленных участков заготовки с боковой поверхностью отрезного диска. На рис. 8 приведена фотография зоны обработки, поясняющая условия проведения этих экспериментов. На боковой поверхности отрезного диска 1 закреплялся предваритель-

но вырезанный из шлифовальной шкурки диск 2, вращение которому сообщалось от электродвигателя 3. Стеклянный образец 4 закреплялся в цилиндрической оправке 5, которая устанавливалась в зажимном устройстве 6 стрелы распиловочной секции. Торцевая поверхность образца, моделирующая его распиленную поверхность, с небольшим усилием прижималась к шлифовальной шкурке, которая моделировала боковую поверхность отрезного диска. Процесс истирания поверхности образца осуществлялся как в обычных условиях обработки, так и при сообщении ему циркуляционного движения. Частота вращения диска составляла 7500 мин$^{-1}$, продолжительность истирания – 10 с. После этого оправка с образцом и диск из шлифовальной шкурки снимались и с помощью микроскопа МИМ-1 исследовалось состояние их поверхностей.

На рис. 9 приведены фотографии поверхности стеклянного образца, полученные при ее истирании о поверхность шлифовальной шкурки в обычных условиях и при возбуждении колебательной системы с частотой 4 Гц.

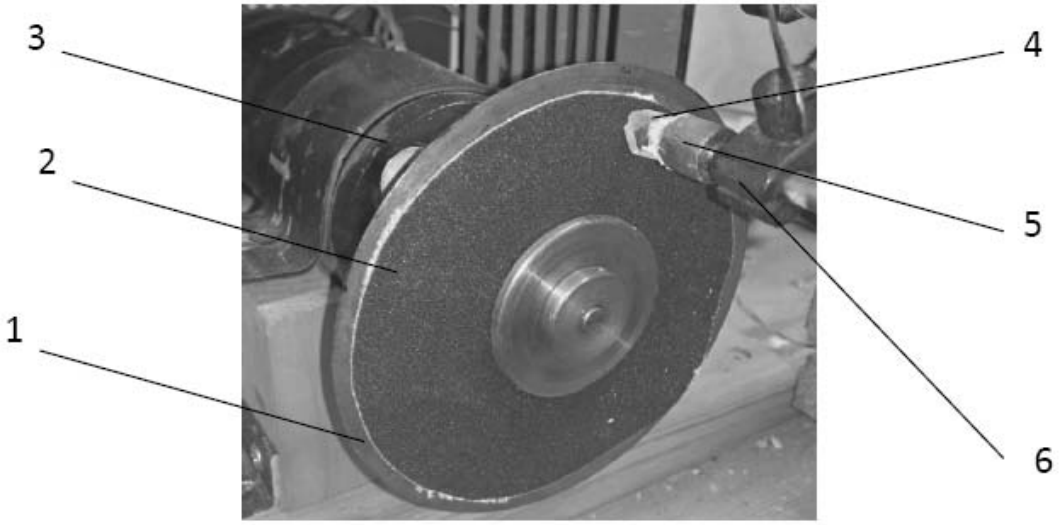


Рис. 8. Фотография зоны обработки при проведении экспериментов по истиранию поверхности образца

а) б)

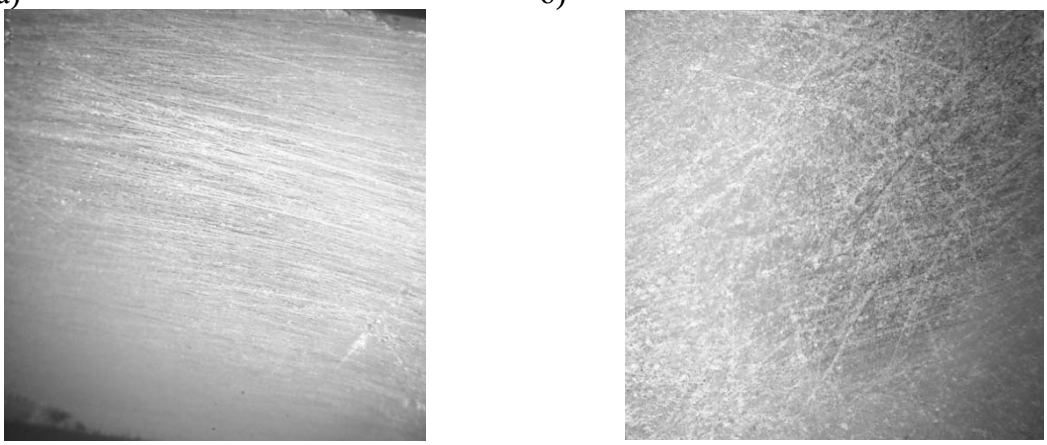


Рис. 9. Фотография поверхности стеклянного образца после ее истирания (увеличение 50^{X}): а – в обычных условиях; б – при возбуждении колебательной системы с частотой 4 Гц

Как видно (рис. 9, а), на поверхности образца при ее истирании в обычных условиях присутствуют однонаправленные следы обработки (риски), имеющие значительные размеры. Во втором случае (рис. 9, б) на поверхности образца почти отсутствуют однонаправленные следы обработки, и поверхность характеризуется более равномерным микрорельефом с меньшей, чем в первом случае, высотой неровностей.

На рис. 10 представлены фотографии поверхности диска из шлифовальной шкурки с дорожками износа, полученными при истирании образца в обычных условиях и при сообщении ему циркуляционного движения по эллиптической траектории.

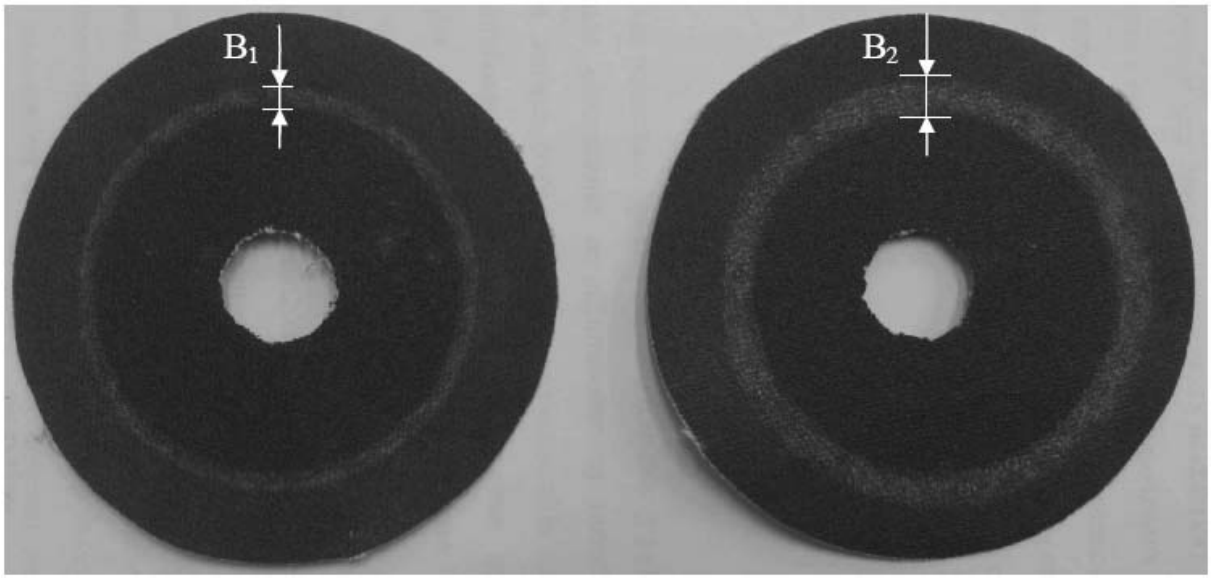


Рис. 10. Фотографии поверхности диска с дорожкой износа, полученной при истирании образца в обычных условиях (слева) и при сообщении ему циркуляционного движения по эллиптической траектории (справа)

Как видно (см. рис. 10), ширина дорожки износа B_2 при истирании образца с возбуждением колебательной системы превышает аналогичный параметр дорожки B_1, полученной при истирании образца в обычных условиях. Это обусловлено наличием вертикально (радиально) направленных колебательных смещений заготовки относительно поверхности шлифовальной шкурки. При этом разность $B_2 - B_1$ соответствует величине $2Aв$, которая зависит от значения большой оси W эллиптической траектории и угла ее наклона α к горизонтальной оси, т. е. $2Aв = W\sin\alpha$ (при $\alpha = 0$). В случае, когда угол α равен нулю, величина $2Aв$ будет соответствовать размеру малой оси h эллиптической траектории движения заготовки. Поэтому, учитывая влияние режимов возбуждения колебательной системы на параметры эллиптической траектории движения заготовки, можно прогнозировать их влияние на шероховатость распиленной поверхности заготовки. В частности, с повышением частоты возбуждения колебательной системы обоснованно ожидать возрастания степени влияния этого движения на снижение шероховатости поверхности площадок распиленных полуфабрикатов по сравнению с обработкой в обычных условиях.

Таким образом, согласно результатам физического моделирования процесса истирания распиливаемой поверхности заготовки с боковой поверхностью шлифовальной шкурки (диска), сообщение ей циркуляционного движе-

ния по эллиптической траектории позволяет снизить в сравнении с истиранием в обычных условиях шероховатость поверхности площадок распиленных полуфабрикатов. При этом степень указанного снижения возрастает с увеличением размера большой оси эллиптической траектории и угла ее наклона относительно горизонтали.

Выводы

1. Предложена математическая модель, позволяющая описать форму траектории на боковой поверхности распиловочного диска, оставляемой точкой, принадлежащей заготовке, совершающей циркуляционное движение по эллиптической траектории. С ее помощью получены формы траекторий, соответствующие различным параметрам эллиптического движения этой точки при различной частоте вращения диска за время его одного оборота. На основании их анализа установлено, что доминирующее влияние на изменение траектории движения точки на поверхности диска оказывают размер большой оси W эллиптической траектории движения заготовки, угол ее наклона α к горизонтали и соотношение периода циркуляционного движения заготовки к частоте вращения диска.

2. С помощью оригинальной методики, основанной на визуализации процесса перемещения точки, принадлежащей заготовке, совершающей эллиптическое движение по поверхности бумажного диска, установленного на модернизированной распиловочной секции вместо распиловочного, экспериментально получены траектории указанного перемещения при различных параметрах циркуляционного движения заготовки и различной частоте вращения диска за время его одного оборота. На основании анализа полученных траекторий установлено, что они имеют пилообразный вид с четко выраженным периодическим характером изменения параметров, к которым относятся величина размаха вертикальных (радиальных) смещений $2Aв$, величина шага между соседними выступами S и угол наклона линии β, соединяющей вершины соседних впадин и выступов, и касательной к окружности, описанной вокруг выступов полученной траектории. Установлено, что с повышением частоты возбуждения колебательной системы модернизированной распиловочной секции величина $2Aв$ и значение угла β увеличиваются, а значение S снижается. Увеличение частоты вращения диска сопровождается возрастанием параметра S траектории движения точки с одновременным уменьшением угла β при почти постоянной величине $2Aв$.

3. Согласно результатам проведенных экспериментальных исследований, за счет изменения частоты возбуждения колебательной системы модернизированной распиловочной секции (а соответственно, и параметров эллиптической траектории движения заготовки) и частоты вращения распиловочного диска можно управлять условиями их относительного скольжения, в частности, значением размаха $2Aв$ вертикальных смещений, шагом выступов S и значением угла β. Доказано, что это, в свою очередь, позволяет активно влиять на условия формирования микрорельефа на пропиленных участках заготовки, обеспечивая за счет ее вертикально направленных колебательных смещений относительно боковых поверхностей диска условие неповторяемости на ней следов обработки, что должно положительно отразиться на снижении ее шероховатости в сравнении с распиливанием в обычных условиях.

4. Для подтверждения вышеизложенного с использованием модернизированной распиловочной секции была проведена серия экспериментов по физическому моделированию процесса взаимодействия (истирания) пропиленных участков заготовки с боковой поверхностью диска. В ходе выполнения экспериментов оценивалось состояние

торцевой поверхности стеклянного образца после ее истирания о поверхность диска из шлифовальной шкурки при их взаимодействии как в обычных условиях, так и при сообщении образцу циркуляционного движения по эллиптической траектории. Согласно результатам проведенных исследований, при истирании образца в обычных условиях на его поверхности присутствуют четко выраженные однонаправленные следы обработки, в то время как на поверхности, полученной при сообщении образцу циркуляционного движения, количество таких следов существенно меньше или они вообще отсутствуют. При этом с увеличением размера большой оси W эллиптической траектории движения образца и угла ее наклона α к горизонтали, что достигается повышением частоты возбуждения колебательной системы, степень положительного влияния циркуляционного движения на повышение качества обработанной поверхности образца возрастает, что в полной мере согласуется с результатами теоретических исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Епифанов, В. И.** Технология обработки алмазов в бриллианты : учебник для ПТУ / В. И. Епифанов, А. Я. Песина, Л. В. Зыков. – М. : Высш. шк., 1987. – 335 с.
2. **Киселев, М. Г.** Повышение интенсивности и качества распиливания твердых и сверхтвердых материалов путем сообщения заготовке двухмерного циркуляционного движения / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная // Вестн. БНТУ. – 2011. – № 5. – С. 36–40.
3. **Киселев, М. Г.** Исследование временных и частотных параметров контактного взаимодействия заготовки с распиловочным диском при сообщении ей двухмерного периодического движения / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная // Вестн. ПГУ. – 2012. – № 3. – С. 102–108.
4. **Киселев, М. Г.** Влияние условий возбуждения стрелы распиловочной секции на параметры колебательного движения заготовки / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная // Материалы, технологии, инструменты. – 2013. – № 1. – С. 78–85.
5. **Киселев, М. Г.** Установка для распиливания монокристаллов алмаза при сообщении заготовке периодического циркуляционного движения / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная // Вестн. ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2011. – № 2. – С. 3–9.
6. **Погорелов, А. В.** Аналитическая геометрия / А. В. Погорелов. – М., 1978. – 208 с.

Статья сдана в редакцию 26 января 2016 года

Михаил Григорьевич Киселев, д-р техн. наук, проф., Белорусский национальный технический университет. E-mail: kiselev.maikl@gmail.com.
Алексей Владимирович Дроздов, канд. техн. наук, доц., Белорусский национальный технический университет. E-mail: dav7@tut.by.
Вячеслав Леонидович Габец, канд. техн. наук, доц., Белорусский национальный технический университет.
Дарья Андреевна Ямная, мл. науч. сотрудник, Белорусский национальный технический университет.

Mikhail Grigoryevich Kiselev, DSc (Engineering), Prof., Belarusian National Technical University. E-mail: kiselev.maikl@gmail.com.
Aleksey Vladimirovich Drozdov, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian National Technical University. E-mail: dav7@tut.by.
Vyacheslav Leonidovich Gabets, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian National Technical University.
Darya Andreyevna Yamnaya, research assistant, Belarusian National Technical University.

УДК 621.75

А. П. Минаков, Н. М. Юшкевич, И. Д. Камчицкая, Е. В. Ильюшина, Д. Л. Зайцев

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ НАПРАВЛЯЮЩИХ СТАНИН МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

UDC 621.75

A. P. Minakov, N. M. Yushkevich, I. D. Kamchitskaya, Y. V. Ilyushina, D. L. Zaitsev

ANALYSIS OF METHODS TO IMPROVE WEAR RESISTANCE OF BEDWAYS OF MACHINE TOOLS

Аннотация

Приведен анализ и рассмотрены преимущества и недостатки способов повышения износостойкости направляющих станин металлорежущих станков. Обобщен положительный опыт использования упрочняющей импульсно-ударной пневмовибродинамической обработки (ПВДО) в качестве окончательной операции при ремонте направляющих станин станков.

Ключевые слова:

упрочнение поверхности, импульсно-ударная пневмовибродинамическая обработка плоских поверхностей, шероховатость, наклеп, износ направляющих, технология ремонта.

Abstract

The paper analyses the methods to improve wear resistance of bedways of metal cutting machines and presents their advantages and disadvantages. It summarizes the positive experience of using strengthening pulse-impact pneumo-vibro-dynamic treatment (PVDT) as the final stage in the repair of the machine-tool bedways.

Key words:

surface hardening, pulse-impact pneumo-vibro-dynamic treatment of flat surfaces, roughness, cold hardening, bedways wear, repair technology

Затраты на ремонт и техническое обслуживание металлорежущих станков в 8 раз превышают их стоимость [2]. Поэтому проблема обеспечения надежности и долговечности станков при их изготовлении и ремонте сегодня носит актуальный характер. Одно из направлений ее решения напрямую связано с повышением износостойкости направляющих станин.

Износ направляющих обусловлен их неполной защитой от попадания стружки, песка и абразива и малыми скоростями перемещений, которые не позволяют обеспечить образование масляных клиньев. Направляющие главного движения в основном выходят из строя из-за заеданий [5].

В металлорежущих станках применяют два основных типа направляющих: скольжения и качения.

Направляющие скольжения классифицируются по различным режимам трения, а именно граничным, гидродинамическим, аэростатическим, гидростатическим, смешанным. Наибольшее распространение получили направляющие со смешанным режимом трения. Их преимущество заключается в том, что они обладают большой нагрузочной возможностью, жесткостью и способностью демпфировать. К отрицательным сторонам относится сильное трение, которое ограничивает перемещение узлов

© Минаков А. П., Юшкевич Н. М., Камчицкая И. Д., Ильюшина Е. В., Зайцев Д. Л., 2016

и механизмов, что ведет к быстрому износу направляющих.

Направляющие качения различаются типом тел качения (ролики или шарики), конструктивными формами, видами кинематики. Они обладают малым трением, обеспечивают высокую плавность перемещений, допускают высокие скорости и ускорения перемещений. Их основными недостатками являются относительно низкое демпфирование, повышенная чувствительность к загрязнению, а также высокая стоимость.

Возможны случаи применения комбинированных направляющих, у которых по одним граням используется скольжение, по другим – качение.

Направляющие станков выполняют преимущественно заодно с литой станиной из чугуна различных марок: серый чугун – СЧ15, СЧ18, СЧ20, СЧ21, СЧ24, СЧ35; высокопрочный чугун – ВЧ45-5.

Стальные сварные станины применяют при относительно простых формах, в индивидуальном и мелкосерийном производстве, а также при больших (особенно ударных) нагрузках. Необходимую износостойкость сварных станин можно обеспечить с помощью накладных направляющих. Обычно их изготавливают из стали с упрочнением до высокой твердости (59 HRC), что повышает их износостойкость [1].

На рис. 1 показаны направляющие токарно-винторезного станка модели 1К62, где поверхности 4…6, по которым перемещается задняя бабка, значительно меньше изнашиваются, чем поверхности 1…3, 7 и 8. Согласно исследованиям [6, 11], при износе поверхностей 4, 5 и 6 на 0,03 мм поверхность 8 оказалась изношенной на 0,10 мм, поверхность 7 – на 0,08 мм, поверхность 1 – на 0,05 мм, поверхность 3 – на 0,25 мм и поверхность 2 – на 0,35 мм. Вследствие такого большого износа при ремонте приходится углублять канавки 10, а поверхности 9, 11 и 12 использовать как базовые. Выявлено, что направляющие 2, 3, 7 для перемещения каретки суппорта более нагружены, чем направляющие для перемещения задней бабки. Однако скорости изнашивания направляющих зависят также и от характера выполняемых работ – в патроне или в центрах. В последнем случае изнашиваются более интенсивно и направляющие перемещения задней бабки.

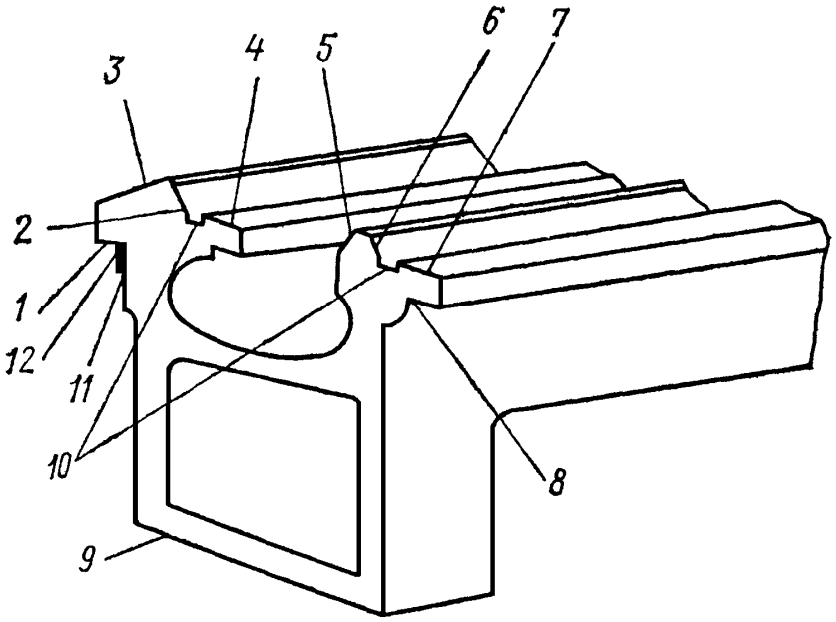


Рис. 1. Направляющие станины токарно-винторезного станка мод. 1К62

В соответствии с ГОСТ 18097-93 при ремонте станин токарных станков допускается непрямолинейность (в сторону выпуклости) не более 0,02 мм на длине 1000 мм.

Износ направляющих – постоянное явление, которое можно замедлить, но невозможно предотвратить.

Основными видами износа направляющих скольжения являются абразивное, адгезионное и усталостное изнашивания.

Абразивное изнашивание возникает в условиях трения, когда твердые частицы, находящиеся в свободном или закрепленном состоянии, режут или царапают поверхность. Наблюдается при загрязнении направляющих и смазочного материала твердыми частицами. Такой износ устраняется за счет повышения уровня технического обслуживания оборудования.

Адгезионное изнашивание возникает в условиях трения, когда два тела скользят друг по другу и частицы материала, вырванные с одной поверхности, прилипают к другой. Этот вид износа имеет место, когда атомы контактирующих поверхностей входят в близкий контакт. Адгезионные взаимодействия вызывают появление заедания, возникновение холодной сварки, повышение интенсивности изнашивания и увеличение сил трения.

Усталостное изнашивание – механическое изнашивание в результате усталостного разрушения при многократном скольжении по одним и тем же поверхностям с непрерывно повторяющимися циклами нагружения. Данный вид износа включает в себя группу видов изнашивания, для которых характерны усталостные разрушения из-за повторного механического взаимодействия неровностей, изнашивание при хрупком разрушении наклепанного слоя, разрушение пленок окислов и т. д.

Износ направляющих приводит к непрямолинейному перемещению режущего инструмента в горизонтальной плоскости, а следовательно, и к образованию погрешностей формы на обработанных поверхностях. Эксплуатационные характеристики станка зависят от его конструкции, жесткости, точности изготовления, формы и размеров направляющих, материала, из которого они изготовлены и т. д. Существенное повышение долговечности направляющих может быть достигнуто их термообработкой, установкой пластин, механическим наклепыванием или поверхностным упрочнением путем накатывания.

Ремонт направляющих станин станков начинают с удаления следов износа и восстановления их геометрической точности. После этого в зависимости от величины износа они подвергаются строганию, фрезерованию, шлифованию, шабрению и притирке.

Строгание и фрезерование поверхности направляющих производят для устранения выработки. Как правило, после этих операций необходимо последующее шлифование или шабрение поверхности. Строгание осуществляется за два-три предварительных прохода и один окончательный при скорости движения стола 8…10 м/мин и глубине резания 0,03…0,05 мм [11]. Шероховатость поверхности при указанных режимах резания получается в пределах Ra = 0,8…1,6 мкм.

Чистовое фрезерование производится фрезой с одной широколезвийной пластинкой из твердого сплава – для стальных направляющих и из минералокерамики – для чугунных. Глубина резания при чистовом фрезеровании 0,1…0,2 мм. Шероховатость обработанной поверхности составляет Ra = 1,6 мкм [11].

Шлифование – наиболее производительный процесс, позволяющий получать поверхность высокой точности и низкой шероховатости (Ra = 0,08…0,32 мкм), однако качество поверхностного слоя при сухом шлифовании ухудшается вследствие образования больших внутренних напряжений, прижогов, микротрещин и шаржирования поверхности зернами аб-

разива. Режимы шлифования: подача 6…8 м/мин, скорость 35…40 м/с [11, 12]. Для предотвращения нагрева обрабатываемой поверхности во время шлифования необходимо использование СОЖ.

Шабрение – достаточно трудоемкий и малопроизводительный процесс обработки, характерный для ремонта незакаленных направляющих станин. Его применяют при износе менее 0,1 мм. Шабрение осуществляется по контрольным плитам, линейкам и специальным приспособлениям. Припуск на шабрение необходимо оставлять минимальным ввиду трудоемкости процесса (например, шабрение станины токарного станка длиной 1500 мм занимает 9 ч).

Притирка применяется как отделочная операция для станин повышенной точности. Во время операции притирки на смазанную поверхность направляющих накладывается сопрягаемая деталь или контрольная плита, на которую кладут груз (200…300 кг) и задают возвратно-поступательное движение со скоростью до 7 м/мин. Время операции притирки составляет от 15 мин до нескольких часов в зависимости от качества поверхности направляющих и размеров станины. Шероховатость обработанной поверхности Ra = 0,02…0,10 мкм.

После восстановления геометрической точности проводят упрочнение направляющих *термической обработкой*, выполнив предварительно отжиг.

Поверхностная закалка с индукционным нагревом токами высокой частоты (ТВЧ) позволяет получать твердость чугуна в зависимости от состава 48…53 HRC при температуре 830…950 ºС. Износ направляющих станин после закалки уменьшается в 2…3 раза и составляет за один межремонтный период (5…9 мес.) в среднем 0,02 мм, за два (10…18 мес.) – 0,03 мм [11]. К недостаткам закалки ТВЧ относят низкий КПД нагрева и излишнюю глубину нагрева, которая приводит к короблению металла.

При газопламенной закалке поверхность нагревается газовыми горелками, сжигающими смесь кислорода с ацетиленом, а затем охлаждается тонкими струями воды. Закалка направляющих станин производится при помощи специальной установки, обеспечивающей равномерное механизированное перемещение горелок. Станина погружается почти до плоскости направляющих в бак с циркулирующей водой для поддержания ее постоянной температуры. Это предохраняет станину от коробления. Скорость перемещения каретки с горелками устанавливается в зависимости от желаемой глубины закаленного слоя. Так, например, при одном проходе пламени со скоростью 100…150 мм/мин глубина закалки получается 3…5 мм. Твердость закаленной поверхности достигает 48…53 HRC. Процесс газопламенной закалки не требует дорогостоящего оборудования и высокой квалификации рабочих, однако используемый технический ацетилен имеет резкий неприятный запах.

При лазерной закалке направляющих может быть получена равномерная глубина термообработаного слоя до 1…2 мм, а его твердость может достигать 60…62 HRC. Лазерный луч быстро нагревает тонкий поверхностный слой металла, который также быстро остывает по мере перемещения луча на другие участки. Охлаждение водой не требуется, отсутствует коррозия станины и направляющих, а температурные деформации станины при закалке лазером меньше, чем при ТВЧ. Однако процесс очень энергоемкий и дорогой.

Повышения износостойкости направляющих можно достигнуть *электро-химико-механическими способами обработки*.

При электроискровой обработке происходит перенос металла с инструмента (анода) на поверхность детали (катод). Однако из-за низкой производительности и высокой трудоемкости этот процесс применяется редко.

Электромеханическая обработка направляющих основана на сочетании термического и силового воздействия на поверхностный слой детали и выполняется вращающимся твердосплавным роликом, закрепленным в пружинной державке. В процессе обработки через место контакта инструмента с деталью проходит ток силой до 2000 А, напряжением 2…6 В, вследствие чего выступающие гребешки поверхности нагреваются и под давлением инструмента деформируются и сглаживаются, а поверхностный слой металла упрочняется. Электромеханическая обработка дает возможность получить закаленную структуру поверхностного слоя. Твердость упрочненного слоя повышается до 589 HB, шероховатость составляет Ra = 1,6 мкм, глубина упрочненного слоя – 0,56 мм [13].

Химико-механическая обработка предусматривает обработку поверхности специальным химическим раствором, в результате которой на поверхности образуется твёрдая кристаллическая фосфатная плёнка толщиной до 0,4 мм. Эта плёнка выполняет роль разделительного слоя между поверхностями трения, способствуя повышению их износостойкости и снижению схватывания. Однако данный процесс не является экологически чистым.

Износостойкость чугунных незакалённых направляющих может быть повышена пористым хромированием, использование которого является наиболее целесообразным для направляющих прецизионных станков из-за малой глубины упрочняемого слоя (0,025…0,050 мм). После хромирования поверхность хорошо удерживает масло в порах, однако требуется последующая притирка чугунным притиром. Основным недостатком хромирования является хрупкость упрочнённого слоя.

Интерес представляет процесс твердого хромирования с последующим нанесением на упрочненной поверхности маслоудерживающей сетки (рис. 2) для повышения износостойкости направляющих станин станков.

Рис. 2. Поверхность направляющих станин с твердым хромированием с последующим нанесением на упрочненной поверхности маслоудерживающей сетки

В последнее время одним из перспективных методов восстановления изношенных направляющих является применение полимерных покрытий немецкой фирмы «Диамант металлпластик GMBH» (Diamant metallplastik GMBH) [4]. По-

верхность ремонтируемых направляющих обрабатывается разделительным составом и зачищается шлифовальным кругом для того, чтобы она приобрела необходимую шероховатость, обеспечивающую лучшую схватываемость с композитным материалом. Далее эта поверхность обрабатывается обезжиривателем. Затем на нее наносится смешанный из нескольких компонентов полимерный материал. На выставочные винты либо специальные планки, обеспечивающие необходимый зазор, устанавливается оборудование (суппорт, задняя бабка). По истечении 24 ч оборудование сдвигается в продольном направлении и переворачивается для удаления излишков выдавленного и застывшего материала. Формирование направляющих выполняется, когда композит находится в пластичном состоянии. Помимо этого, композитные полимерные материалы обеспечивают стойкость к химическим и физическим воздействиям, обрабатываются как металл, обеспечивают получение точных сопряжений, не дают усадки и имеют длительный срок выработки, позволяющий производить сложные операции по монтажу конструкций до момента начала полимеризации материала.

С целью повышения износостойкости направляющих станин станков применяется *поверхностно-пластическое деформирование материала*.

Обкатка шариками (роликами) плоских поверхностей обеспечивает поверхностное деформирование (смятие) микронеровностей, упрочнение поверхностного слоя детали и приводит к снижению шероховатости обрабатываемой поверхности (Ra = 0,1…2,0 мкм) [9]. Обкатка производится на продольно-строгальном станке после чистового строгания.

Отрицательными факторами, ограничивающими использование обкатки шариками (роликами) направляющих, являются перенаклеп поверхностных слоев, получение слишком гладкой поверхности, не способной удерживать масло, неравномерное протекание в некоторых случаях пластического деформирования, связанное с неправильной настройкой инструмента [6].

Вибрационное накатывание и вибрационное выглаживание с образованием тонкого пластически деформированного упрочненного слоя направляющих станин применяют с целью создания регулярных микрорельефов сферического профиля. При вибронакатывании, помимо осевой подачи (как и при выглаживании), инструменту, поджатому к обрабатываемой поверхности с некоторой силой, сообщается возвратно-поступательное перемещение вдоль детали. Вибронакатывание стальным закаленным шаром применяют при обработке плоской поверхности с твердостью до 40 HRC. Вибровыглаживанием с использованием сферического наконечника из алмаза или другого сверхтвердого материала можно обрабатывать поверхности высокой твердости до 50…60 HRC [8].

При вибрационном накатывании происходит создание системы канавок, которая способствует увеличению маслоемкости поверхности [3]. Износостойкость направляющих станин станков, обработанных, например, способом вибронакатывания, в 1,6 раз выше по сравнению с шабренными направляющими.

Однако, наряду с достоинствами, процесс вибронакатывания имеет и существенные недостатки: процесс является малопроизводительным и не обеспечивает упрочнения всей обрабатываемой поверхности (площадь канавок составляет лишь около 40 %); созданная система канавок, кроме масла, удерживает твердые частицы, вызывающие абразивный износ.

Следует также отметить, что изготовление специальных шаров из определенного материала с заданной точностью для вибрационного накатывания чрезвычайно затруднено, а изготовле-

ние сферических наконечников из любого материала несложно. Поэтому вибровыглаживание является методом, имеющим более широкие технологические возможности по сравнению с вибронакатыванием, но во многих случаях уступает ему по производительности.

Для упрочнения поверхности направляющих используют статико-импульсную обработку (СИО) [7]. Ее особенностью является комбинированное статическое и динамическое нагружение очага деформации. Основное деформационное воздействие происходит за счет динамической составляющей нагрузки, которая формируется в ударной системе и сообщается в очаг деформации в виде импульса. Предварительное статическое поджатие инструмента к обрабатываемой поверхности позволяет полнее использовать энергию ударного импульса. За счет ударных систем с промежуточным звеном появилась возможность резко увеличить количество энергии, сообщаемой в очаг деформации в процессе СИО, что позволило в несколько раз увеличить глубину упрочненного слоя. При СИО в очаге деформации формируются пролонгированные (продленные) импульсы, энергия которых в 2...3 раза выше по сравнению с импульсами, возникающими при других способах динамического упрочнения ППД. При обработке инструментом с локализованным контактом удается максимально пролонгировать действие контактной нагрузки, обеспечить более полную реализацию энергии импульса на осуществление упругопластической деформации.

Технология упрочнения СИО включает следующие этапы: предварительное статическое и последующее периодическое импульсное нагружения инструмента. СИО осуществляется при помощи специально разработанного высокочастотного генератора механических импульсов, позволяющего регулировать энергию и частоту импульсов в широком диапазоне.

Преимуществами СИО перед другими способами ППД являются высокий коэффициент передачи энергии упрочняемой поверхности, возможность воздействия на упрочняемую поверхность управляемым импульсом, компактность устройства для упрочнения, возможность установки его на металлообрабатывающее оборудование. Однако при таком способе обработки возможен перенаклеп поверхности заготовки, что может иметь негативные последствия в процессе эксплуатации.

Новым процессом для упрочнения плоских поверхностей является импульсно-ударная пневмовибродинамическая обработка (ПВДО). Она предназначена для финишной безабразивной обработки направляющих станин металлорежущих станков с целью повышения их износостойкости в 1,5…2,0 раза по сравнению со шлифованными поверхностями [6].

Сущность ПВДО заключается в разнонаправленном многократном импульсно-ударном воздействии деформирующих шаров, получающих ударные импульсы от приводящих шаров, на исходный микрорельеф обрабатываемой поверхности. Источником энергии для приводящих шаров является сжатый воздух, который направляется тангенциально расположенными по окружности соплами при его адиабатическом истечении. Благодаря турбулентному кольцевому потоку сжатого воздуха все шары интенсивно охлаждаются, что обусловливает их значительную стойкость.

Использование ПВДО для ремонта направляющих токарного станка имеет следующие преимущества:

– снижение трудоемкости обработки направляющих в 5…6 раз по сравнению с применявшимся ранее шлифованием без охлаждения и в 2…3 раза по сравнению со шлифованием с использованием охлаждения;

– отсутствие прижогов и шаржирования обрабатываемой поверхности абразивными микрочастицами;

– отсутствие задиров во время приработки поверхностей пары трения;

– отсутствие микротрещин, являющихся очагами разрушения поверхности и коррозии и присутствующих на поверхности после традиционных способов обработки резанием;

– уменьшение коэффициента трения между контактирующими поверхностями на 20 %;

– наличие деформационно упрочненного слоя на глубину до 0,1 мм с твердостью на поверхности до 42 HRC в результате ударного воздействия стальных шаров;

– повышение маслоемкости поверхности на 30 % за счет создания на ней сетки микролунок, являющихся одновременно микроподшипниками (при наличии жидкой смазки) и ловушками, ограничивающими миграцию продуктов износа и их разрушительное действие (рис. 3).

Инструмент для импульсно-ударной ПВДО направляющих станин станков представлен на рис. 4.

Рис. 3. Поверхность, обработанная упрочняющей импульсно-ударной ПВДО

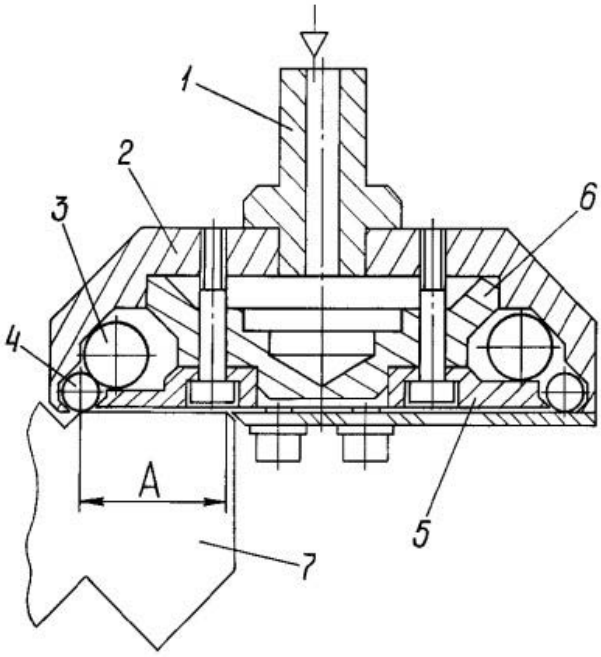


Рис. 4. Конструкционная схема инструмента для ПВДО: 1 – полый вал; 2 – корпус; 3 – приводящие шары; 4 – деформирующие шары; 5 – диск; 6 – стакан; 7 – заготовка

Инструмент состоит из оправки 1 с корпусом 2, в котором расположены приводящие 3 и деформирующие 4 шары. Оба кольцеобразных ряда шаров зафиксированы в камере посредством диска 5 и стакана 6. В стакане 6 выполнены сопла (не показаны), предназначенные для направления струй сжатого воздуха на приводящие шары 3. Шары имеют многоосное вращение относительно собственного центра масс и перемещение в турбулентном кольцевом потоке сжатого воздуха. Разнонаправленное силовое воздействие шаров на исходный микрорельеф способствует созданию благоприятных пластических сдвигов слоев металла и его деформационному упрочнению. Пластическое деформирование поверхности происходит за счет нанесения ударов приводящими шарами 3 по деформирующим 4 в зоне обработки, а теми, в свою очередь, – по заготовке. Анализ работы представленного инструмента показал необходимость совершенствования его конструкции с целью снижения уровня шума и увеличения силы удара шаров по обрабатываемой поверхности.

Усовершенствованная конструктивная схема инструмента для ПВДО плоских поверхностей с учетом описанных недостатков представлена на рис. 5 [10].

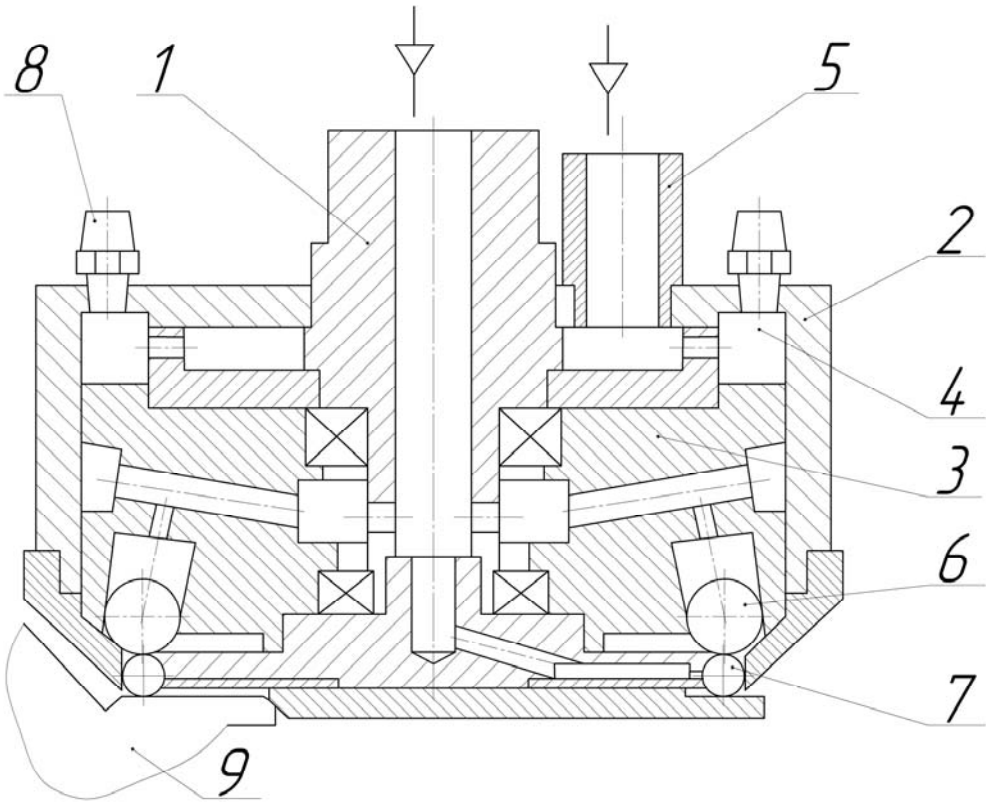


Рис. 5. Усовершенствованная конструкция инструмента: 1 – полый вал; 2 – корпус; 3 – диск; 4 – лопатки; 5 – штуцер; 6 – приводящие шары; 7 – деформирующие шары; 8 – пневмоглушители; 9 – заготовка

В отличие от предыдущей модели перемещение приводящих шаров 6 осуществляется совместно с диском 3, в котором для них выполнены локальные гнезда. Под действием сжатого воздуха, подводимого от системы питания через штуцер 5 и сопла на лопатки 4 инструмента, диск 3 вместе с приводящими шарами 6, размещенными в его гнездах, начинает вращаться вокруг оси полого вала 1. При этом приводящие шары 6 под действием центробежной силы

наносят удары по деформирующим шарам 7, а те, в свою очередь, по обрабатываемой поверхности 9. Вращение диска совместно с приводящими шарами обеспечивает не только их высокую скорость, но и большую силу удара по деформирующим шарам за счет массы диска. В результате происходит пластическое деформирование и упрочнение обработанной поверхности, создается сетка лунок, увеличивающая маслоемкость этой поверхности.

Для регулировки усилия прижатия и охлаждения зоны обработки к приводящим шарам 6 предусмотрена подача сжатого воздуха, подаваемого через осевой канал вала 1. Этот же осевой канал использован и для замедления вращения деформирующих шаров 7, сжатый воздух к которым подается через сопла. Таким образом, можно управлять процессом ПВДО, что значительно упрощает обработку.

Данная конструкция инструмента позволит повысить производительность обработки и увеличить глубину наклепанного слоя. Использование глушителей даст возможность снизить уровень звукового давления до санитарных норм.

Выводы

1. Анализ представленных методов повышения износостойкости ремонтируемых направляющих станин показал, что наиболее приемлемым окончательным способом обработки является поверхностное пластическое деформирование, позволяющее получить упрочненный поверхностный слой с повышенными физико-механическими свойствами и увеличить маслоемкость поверхности без значительных материальных затрат.

2. Наиболее эффективной финишной технологией для обработки направляющих станин станков при их изготовлении и ремонте на предприятиях является ПВДО, которая содержит в себе все преимущества ППД, приводит к снижению износа и повышению срока службы направляющих.

3. Усовершенствованная конструкция инструмента для ПВДО позволит управлять процессом обработки, снизить уровень звукового давления, повысить производительность обработки и увеличить глубину упрочненного слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Боровик, А. Г.** Металлорежущие станки : учеб.-метод. комплекс / А. Г. Боровик. – Проспект, 2015. – 224 с.

2. **Гаркунов, Д. Н.** Триботехника (износ и безызносность) : учебник / Д. Н. Гаркунов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : МСХА, 2001. – 616 с.

3. **Горохов, В. А.** Улучшение эксплуатационных свойств деталей и инструмента методами вибронакатывания и вибровыглаживания / В. А. Горохов. – М. : НИИмаш, 1983. – 64 с.

4. Восстановление направляющих станков с помощью полимерного материала / В. П. Гришко, Д. А. Воробьев В. Б. Струтинский, Е. А. Ищенко // Вестн. Приоз. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 2, Вып. 30. – С. 91–97.

5. **Каминская, В. В.** Станины и корпусные детали металлорежущих станков / В. В. Каминская, З. М. Левина, Д. Н. Решетов. – М. : МАШГИЗ., 1960. – 365 с.

6. **Камчицкая, И. Д.** Упрочняющая технология восстановления направляющих станин станков на основе лезвийной и пневмовибродинамической обработки : дис. … канд. техн. наук : 05.02.08 / И. Д. Камчицкая. – М., 2006. – 129 л.

7. **Кокорева, О. Г.** Технологические возможности статико-импульсной обработки / О. Г. Кокорева // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2011. – № 2. – С. 48–50.

8. **Одинцов, Л. Г.** Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием : справочник / Л. Г. Одинцов. – М. : Машиностроение, 1987. – 328 с.

9. **Папшев, Д. Д.** Упрочнение деталей обкаткой шариками / Д. Д. Папшев. – М. : Машиностроение, 1968. – 132 с.

10. Способ обработки поверхностным пластическим деформированием плоской поверхности и инструмент для его осуществления : пат. BY 12473 U, МПК^6 B 24B 39/06 / А. П. Минаков, Д. Л. Зайцев ; заявители и патентообладатели А. П. Минаков, Д. Л. Зайцев. – № a20060866 ; заявл. 29.08.06 ; опубл. 30.04.08. – 4 с.

11. **Пекелис, Г. Д.** Технология ремонта металлорежущих станков / Г. Д. Пекелис, Б. Т. Гельберг. – М. : Машиностроение, 1984. – 240 с.

12. **Стерин, И. С.** Слесарь-ремонтник металлорежущих станков / И. С. Стерин. – Л. : Лениздат, 1980. – 288 с.

13. **Халимов, Р. Ш.** Повышение виброустойчивости суппорной группы токарных станков на основе образования регулярного рельефа поверхности направляющих : дис. … канд. техн. наук : 23.12.11 / Р. Ш. Халимов. – М., 2011. – 177 л.

Статья сдана в редакцию 25 апреля 2016 года

Анатолий Петрович Минаков, д-р тех. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел. : +375-291-11-91-84.
Надежда Михайловна Юшкевич, преподаватель, Белорусско-Российский университет.
Ирина Дмитриевна Камчицкая, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
Елена Валерьевна Ильюшина, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-298-45-25-55.
Денис Леонидович Зайцев, инженер, РУП «Белнипиэнергопром».

Anatoly Petrovich Minakov, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-291-11-91-84.
Nadezhda Mikhailovna Yushkevich, lecturer, Belarusian-Russian University.
Irina Dmitriyevna Kamchitskaya, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
Yelena Valeryevna Ilyushina, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-298-45-25-55.
Denis Leonidovich Zaitsev, engineer, RUP «Belnipienergoprom».

УДК 621.791.763.2

А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, А. А. Степанов, М. С. Колобова, Д. А. Денисов

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КОНТАКТНОЙ РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ КРОНШТЕЙНА ЛИФТА ПО КОЛЬЦЕВОМУ РЕЛЬЕФУ

UDC 621.791.763.2

A. Y. Polyakov, S. M. Furmanov, A. A. Stepanov, M. S. Kolobova, D. A. Denisov

DEVELOPMENT OF A POWER-SAVING TECHNOLOGICAL PROCESS OF RESISTANCE PROJECTION WELDING OF LIFT BRACKETS BY USING ANNULAR PROJECTIONS

Аннотация

Разработан высокоэффективный энергосберегающий технологический процесс контактной рельефной сварки кронштейнов лифтов по кольцевым рельефам, позволяющий за счет двухэтапного дозированного введения электрической энергии в межэлектродную зону уменьшить в 10 раз энергопотребление контактной машины в каждом цикле сварки при обеспечении приемлемого уровня прочности сварных соединений.

Ключевые слова:

контактная рельефная сварка, кронштейн лифта, стандартный болт, кольцевой рельеф, система автоматического управления, двухступенчатый импульс тока, дозированный ввод энергии, энергосберегающий режим, спецэлектрод, цинковое покрытие.

Abstract

A highly effective power-saving technological process has been developed to weld lift brackets by means of resistance projection welding with annular projections which allows for 10-times reduction of power consumption in the welding machine during each welding cycle due to a two-step dosed input of electric power into the interelectrode zone, with an acceptable level of strength of welded joints being provided.

Key words:

resistance projection welding, lift bracket, standard bolt, annular projection, automatic control system, two-step current pulse, dosed power input, power-saving mode, special electrode, zinc coating.

На Могилевском заводе лифтового машиностроения (Республика Беларусь) при изготовлении пассажирских и грузовых лифтов используются кронштейны, состоящие из двух деталей: пластины с отверстием (материал – сталь 08кп, толщина – 3 мм, наружный диаметр 64 мм, диаметр отверстия – 10 мм) и стандартного болта М10 × 24 (материал – сталь 35, толщина шляпки – 6 мм). Годовая программа выпуска кронштейнов – 200000 шт.

На заводе кронштейны производят вручную способом механизированной дуговой сварки в углекислом газе плавящимся электродом. При этом болт приваривается к пластине не по всему периметру, а в двух местах – двумя короткими угловыми швами длиной по 8…10 мм каждый (рис. 1).

Изготовление таких кронштейнов дуговой сваркой является трудоемким процессом. При этом в ряде случаев не удается обеспечить плотность прилега-

© Поляков А. Ю., Фурманов С. М., Степанов А. А., Колобова М. С., Денисов Д. А., 2016

ния пластины к шляпке болта по всей площади контакта, из-за чего в процессе прижатия кронштейна к стенке лифта пневматическим инструментом происходит продавливание жидкой резины, добавляемой между кронштейном и стенкой, в зазоры, что недопустимо и является браком. Эстетический вид кронштейнов с неровными валиками швов неудовлетворительный.

Рис. 1. Объект исследований – кронштейн лифта (в): а – пластина с отверстием; б – стандартный болт М10 × 24

При производстве кронштейнов авторами было предложено заменить механизированную дуговую сварку в углекислом газе на контактную рельефную сварку (КРС), характеризующуюся повышенной производительностью, экологичностью и отсутствием следов сварки [1, 2]. При этом планировалось, что использование кольцевого рельефа обеспечит требование герметичности формируемого соединения. Второй целью была разработка высокоэффективного энергосберегающего режима КРС кронштейна.

В ходе экспериментов были приняты следующие допущения: вместо стандартного болта М10 × 24 из стального прутка (материал – сталь 20) изготавливались круглые заготовки диаметром 16 мм и высотой 6,1 мм, имитирующие шляпку болта (рис. 2); размер кольцевого рельефа выбирался исходя из возможностей токарно-фрезерной обработки нижней поверхности шляпки болта: внутренний диаметр рельефа $d_{ВН}$ = 11,6 мм, наружный диаметр $d_{Н}$ = 16 мм, высота рельефа $h_{Р}$ = 1,1 мм (рис. 3).

Рис. 2. Шляпки болтов с кольцевыми рельефами

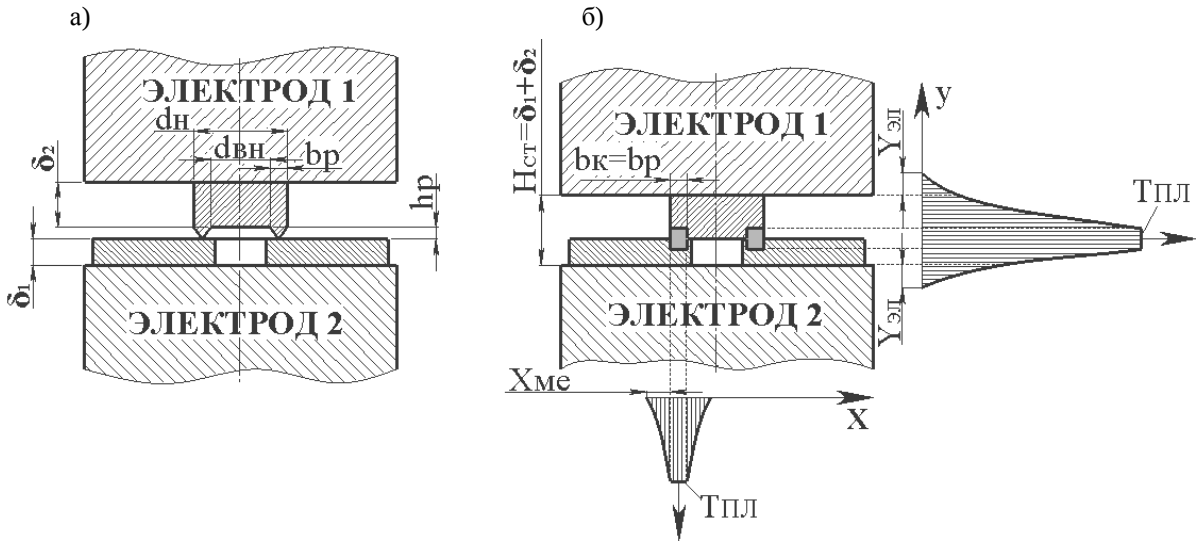


Рис. 3. Геометрия шляпки и пластины кронштейна перед сваркой (а) и схема расчета уравнения теплового баланса соединения (б)

Далее составлялось уравнение теплового баланса [2] (см. рис. 3).

На рис. 3: δ_1 и δ_2 – толщина пластины и шляпки болта соответственно; b_P – ширина рельефа; $H_{СТ}$ – высота условно нагреваемого столбика металла; b_K – ширина контакта «деталь – деталь»; $X_{МЕ}$ – ширина зоны теплоотвода в пластину; $Y_{ЭЛ}$ – ширина зоны теплоотвода в электроды; $T_{ПЛ}$ – температура плавления деталей.

В результате расчета уравнения теплового баланса с учетом рекомендаций в технической литературе был определен режим сварки данного соединения, принимаемый за базовый (рис. 4, а). Циклограмма базового режима сварки кронштейнов с приложением постоянного усилия сжатия электродов и крутонарастающим импульсом сварочного тока представлена на рис. 4, б [1, 2].

Для осуществления КРС кронштейнов использовалась машина контактной точечной сварки МТ-3201 с регулятором цикла сварки РКС-801 (рис. 5, а) и плоские электроды-насадки увеличенного диаметра (рис. 5, б). Сваренные образцы испытывались на статическое продавливание шляпки болта пуансоном в матрицу (рис. 5, в). Использовалась испытательная машина РГМ-1000 (рис. 5, г).

При базовом режиме сваривалось восемь образцов. В результате прочностных испытаний установлено, что минимальное усилие разрушения образцов составило 19,29 кН. Характер разрушения – вязкий вырыв без видимых участков твердой фазы [3], что свидетельствует об объемном взаимном расплавлении металла деталей и наличии литого ядра (рис. 6, а).

Далее варьировали жесткость базового режима КРС кронштейнов (рис. 6, б…з) и установили оптимальное соотношение «ток – длительность протекания тока» (см. рис. 6, в).

Далее была проведена оптимизация полученного режима КРС кронштейнов по усилию сжатия электродов (рис. 7, а…е).

В результате определен скорректированный базовый режим КРС кронштейнов (табл. 1), сварка на котором позволила увеличить усилие разрушения сварного соединения при продавливании с 19,3 до 25,8 кН. Характер разрушения – вязкий вырыв без видимых участков твердой фазы (см. рис 7, г).

В табл. 1 $\tau_{СВ}$ – длительность проте-

кания сварочного тока; $Q_{ЭЭ}$ – электрическая энергия, вводимая в межэлектродную зону; $F_{СВ}$ – усилие сжатия электродов; $\tau_{СЖ}$ – длительность предварительного сжатия электродов; $\tau_{КОВ}$ – длительность проковки.

Далее применили экспериментальную установку (рис. 8, а), в основе которой лежит система автоматического управления процессом КРС (рис. 8, б) на базе аналого-цифрового устройства сбора данных NATIONAL INSTRUMENTS и среды графического программирования LABVIEW, созданная и запатентованная ранее.

а)

Параметр режима	Значение
$I_{СВ}$, А	19300
$F_{СВ}$, Н	6000
$\tau_{СЖ}$, с	0,8
$\tau_{СВ}$, с	0,6
$\tau_{КОВ}$, с	0,8
$R_{ЭЭ}$, мкОм	90
$Q_{ЭЭ}$, Дж	20031
$d_{Э}$, мм	57
$d_{РНАР}$, мм	16
$d_{РВНУТР}$, мм	11,6
$h_{Р}$, мм	1,1

б)

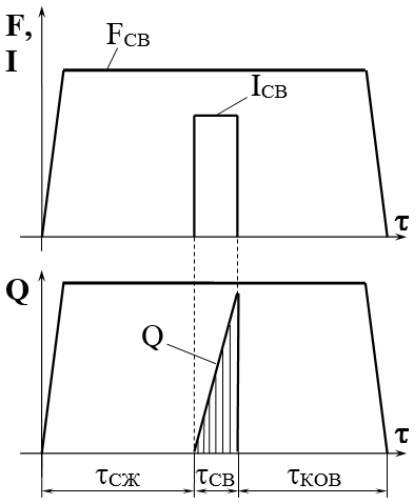


Рис. 4. Параметры базового режима КРС кронштейна лифта (а) и циклограмма процесса сварки (б)

а) б) в) г)

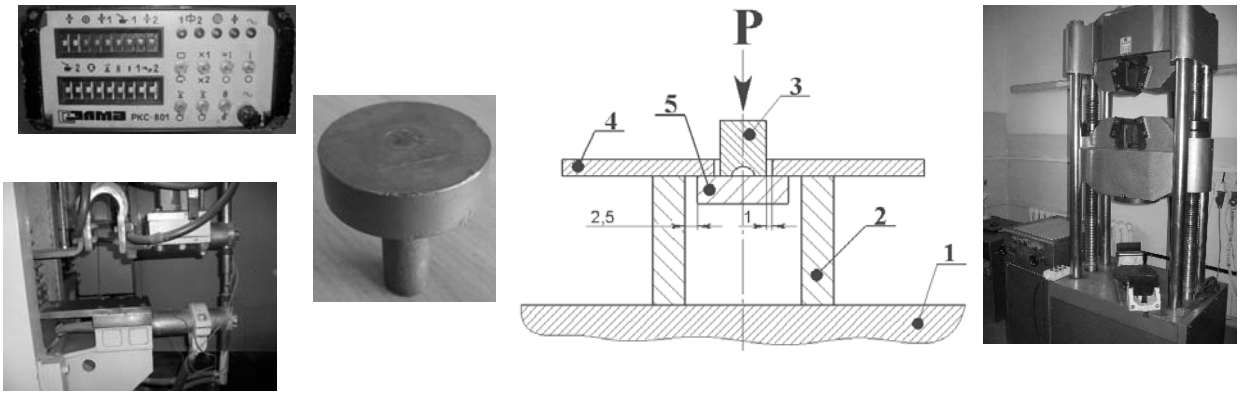


Рис. 5. Машина МТ-3201 (а), электрод с увеличенной контактной поверхностью (б), схема испытания на статическое продавливание (в) и испытательная машина РГМ-1000 (г): 1 – неподвижная плита; 2 – оправка; 3 – пуансон; 4 – пластина с отверстием; 5 – шляпка болта

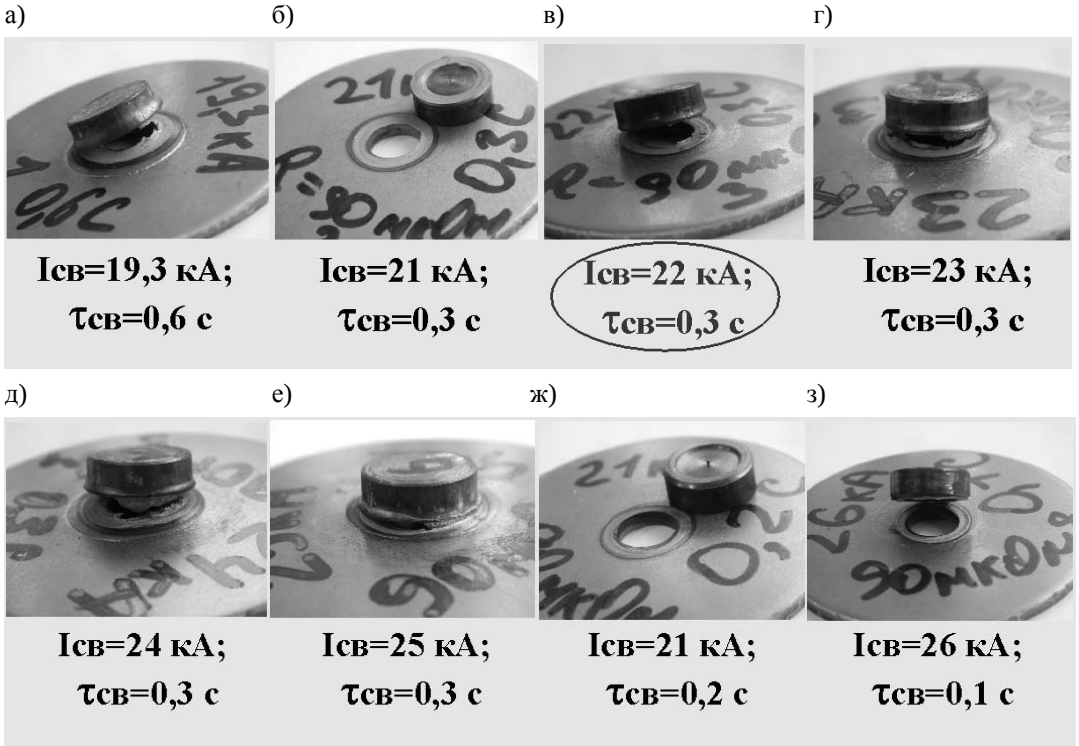


Рис. 6. Оптимизация жесткости базового режима сварки кронштейна (варьировали соотношение «ток $I_{СВ}$ – длительность протекания тока $\tau_{СВ}$»)

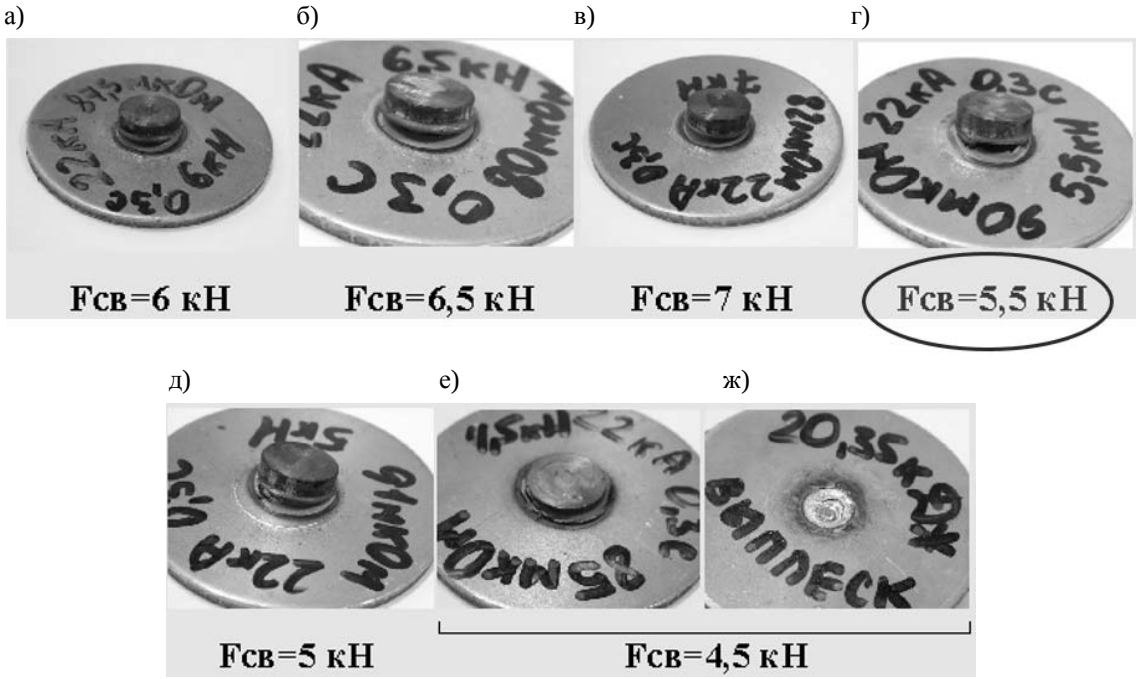


Рис. 7. Оптимизация усилия сжатия электродов базового режима сварки кронштейна

Табл. 1. Скорректированный базовый режим сварки кронштейна

$I_{СВ}$, кА	$\tau_{СВ}$, с	$Q_{ЭЭ}$, Дж	$F_{СВ}$, кН	$\tau_{СЖ}$, с	$\tau_{КОВ}$, с	$d_{Н}$, мм	$d_{ВН}$, мм	$h_{Р}$, мм
22	0,3	12300	5,5	0,8	0,6	16	11,6	1,1

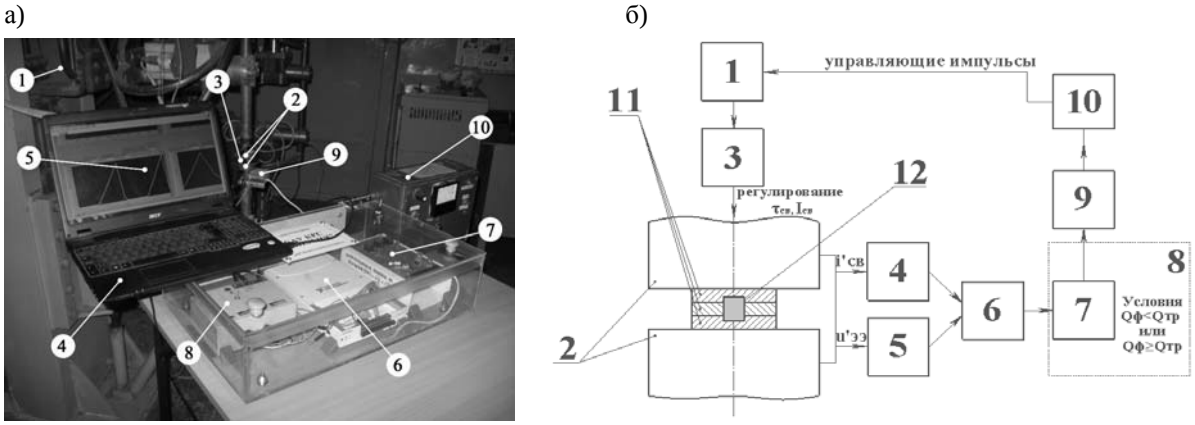


Рис. 8. Экспериментальная установка (а) и структурная схема системы автоматического управления процессом КРС (б)

На рис. 8, а: 1 – контактная машина МТ-3201; 2 – электроды под рельефную сварку; 3 – свариваемые детали; 4 – ЭВМ; 5 – интерфейс среды LVW; 6 – устройство сбора данных; 7 – устройство согласования; 8 – источник питания датчика тока; 9 – датчик тока ДТПХ-32000; 10 – пояс Роговского для тарировки датчика тока.

На рис. 8, б: 1 – регулятор; 2 – электроды; 3 – контактор; 4 – датчик тока; 5 – датчик напряжения; 6 – устройство сбора данных; 7 – ЭВМ; 8 – среда LABVIEW; 9 – устройство согласования; 10 – кабель управления; 11 – свариваемые детали; 12 – литая зона.

Данная установка позволяет задавать многоступенчатый импульс сварочного тока и дозированно вводить в межэлектродную зону электрическую энергию путем ее отдельного задания на каждой из ступеней импульса тока. Таким образом, имеется возможность существенного уменьшения суммарной электрической энергии, вводимой в межэлектродную зону, относительно расчетного значения (по уравнению теплового баланса) с соответствующим уменьшением электроэнергии, потребляемой контактной машиной из сети в каждом цикле сварки. При этом, как было исследовано ранее, при определенных соотношениях «задаваемый ток – вводимая энергия» можно не только обеспечить прочность формируемых рельефных сварных соединений, но и добиться ее повышения [4–6].

При сварке с системой автоматического управления в межэлектродную зону вводилось 10 % энергии по сравнению с базовым режимом (1230 вместо 12300 Дж), причем в два этапа (табл. 2): сначала вводилось 5 % энергии (615 Дж) на токе подогрева, равном 50 % от базового (11 кА), затем вводилось 5 % энергии (615 Дж) на базовом токе (22 кА) (рис. 9, а). Сваривалось девять образцов. Фактическая длительность поэтапного ввода энергии составила 0,22 и 0,1 с соответственно.

Характер разрушения – вязкий вырыв, чередующийся с участками твердой фазы (рис. 9, б).

При испытании на статическое продавливание наименьшее усилие разрушения составило 19,9 кН (рис. 10).

Табл. 2. Параметры предлагаемого режима КРС кронштейна

$I_{СВ1}$, кА	$\tau_{СВ1}$, с	Q_1, Дж	$I_{СВ2}$, кА	$\tau_{СВ2}$, с	Q_2, Дж	$F_{СВ}$, кН	$\tau_{СЖ}$, с	$\tau_{КОВ}$, с	$d_Н$, мм	$d_{ВН}$, мм	$h_Р$, мм
11	0,22	615	22	0,1	615	5,5	0,8	0,6	16	11,6	1,1

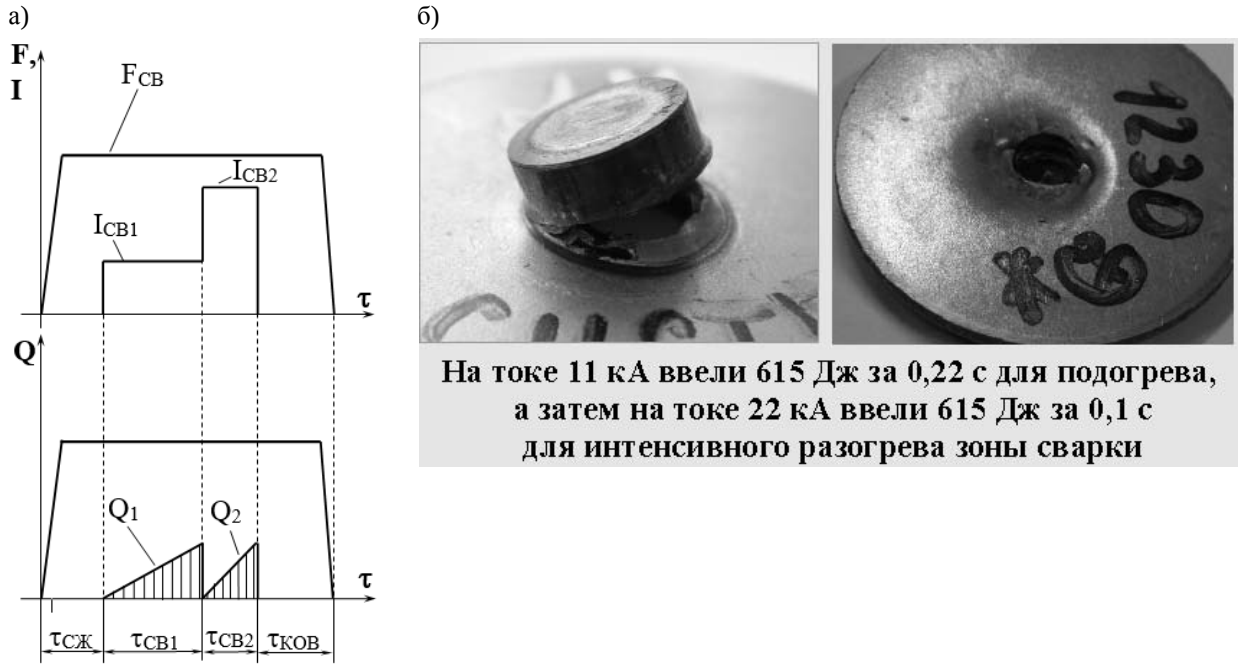


Рис. 9. Циклограмма предлагаемого способа КРС с системой автоматического управления (а) и характер разрушения одного из образцов при прочностных испытаниях (б)

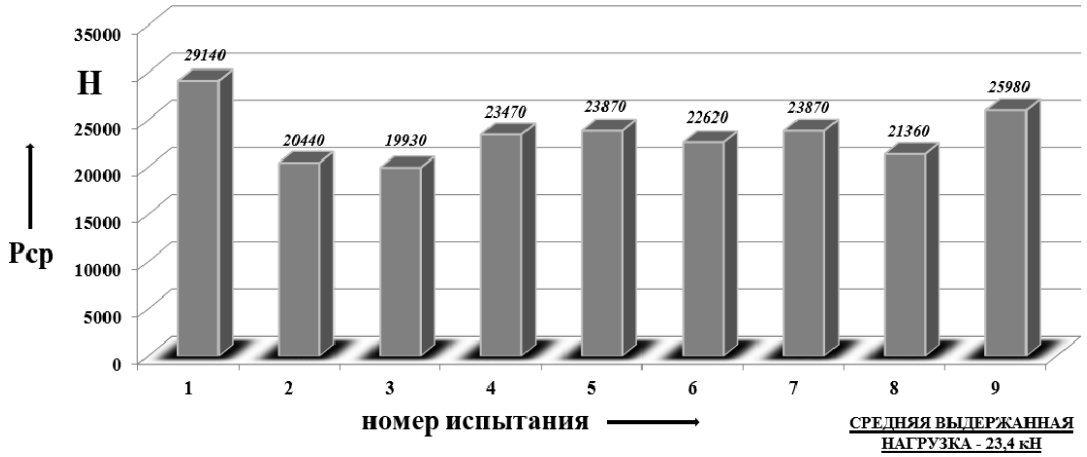


Рис. 10. Разброс прочностных показателей

Энергия, фактически вводимая в межэлектродную зону при данном режиме, составляла 1230 Дж, что в 10 раз меньше, чем при сварке при базовом режиме. При этом происходит соответствующая экономия электроэнергии, потребляемой сварочной контактной машиной в каждом цикле сварки.

Указанный режим сварки обеспечивает достаточную точность сварного соединения (конечная величина зазора между шляпкой болта и пластиной – 0,2…0,3 мм, деформирование и утонение шляпки болта при сварке – не более 0,3 мм), а также его высокую прочность при испытании на статическое продавливание – не менее 20 кН.

Затем уравнение теплового баланса пересчитали, исходя из размеров стандартного болта М10 × 24 (с учетом длины болта), а также конструкции специального электрода, необходимого для позиционирования деталей узла (рис. 11).

Расчетная величина электрической энергии, необходимой для ввода в межэлектродную зону, составила 18435 Дж. Требуемый сварочный ток – 18,5 кА.

Так как при пересчете требуемый сварочный ток уменьшился лишь на 0,8 кА по сравнению с базовым режимом (см. рис. 4, а), то первоначально рассчитанный ток 19,3 кА изменять не потребовалось (небольшое завышение тока компенсируется теплоотводом в стержень болта). Соответственно, базовый режим сварки кронштейна, представленный в табл. 1, коррекции не подлежит.

Далее на токарно-фрезерном станке на нижней части шляпки болта изготавливался кольцевой рельеф в соответствии с размерами, представленными в табл. 2.

Затем из меди М1 по схеме на рис. 11 был изготовлен специальный электрод с фторопластовой вставкой под болт (рис. 12, а). На рис. 12, б…г показана последовательность укладки деталей кронштейна на спецэлектрод перед сваркой.

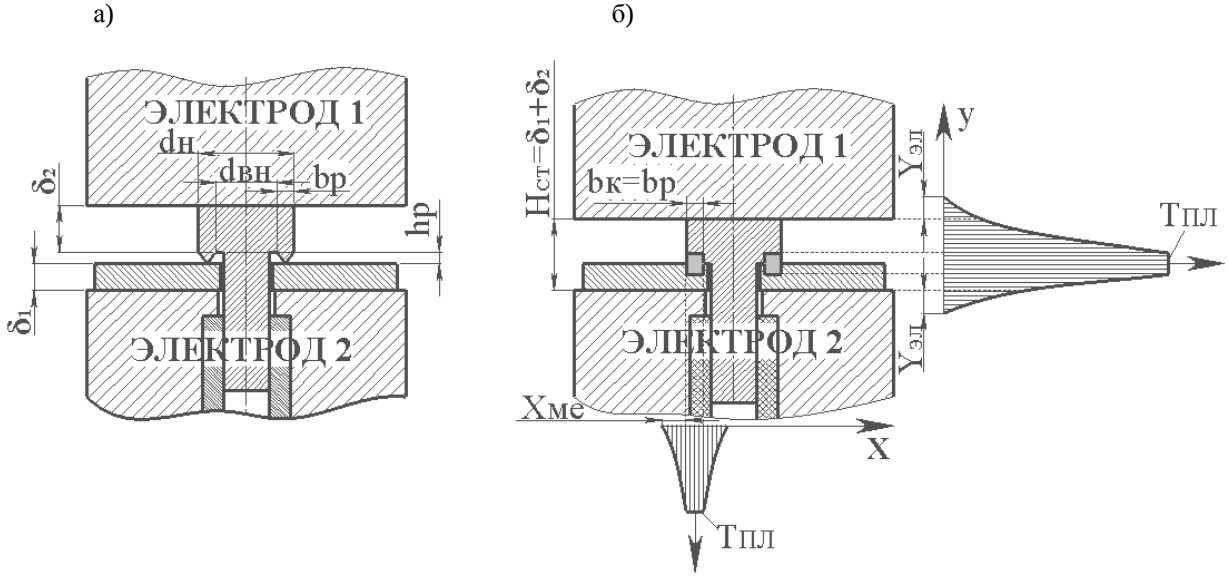


Рис. 11. Геометрия стандартного болта М10 × 24 и пластины кронштейна перед сваркой (а) и схема расчета уравнения теплового баланса соединения (б)

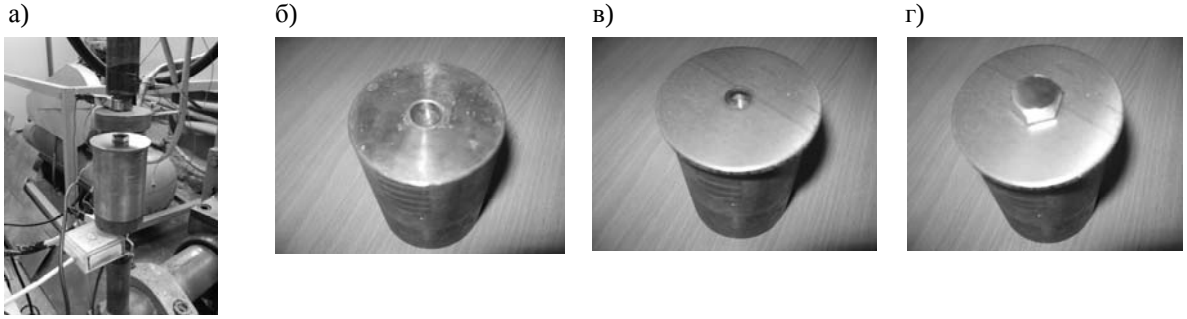


Рис. 12. Позиционирование спецэлектрода на плоском электроде сварочной машины (а) и последовательность укладки деталей кронштейна на специальный электрод перед сваркой (б…г)

При эксперименте необходимо было посредством предложенного электрода со вставкой сварить три кронштейна (стандартный болт М10 × 24 + пластина с отверстием) с последующей визуальной оценкой точности и испытанием сварных соединений на статическое продавливание. Режимы сварки соответствовали табл. 2 с дополнением размеров контактной поверхности специального электрода: наружный диаметр электрода – 57 мм, внутренний диаметр – 11 мм, диаметр фторопластовой вставки под центрирование болта – 10 мм.

При сварке трех кронштейнов с использованием режима, представленного в табл. 1, фактическая длительность протекания сварочного тока на каждой из ступеней импульса составила $\tau_{СВ1}$ = 0,42 с и $\tau_{СВ2}$ = 0,1 с соответственно (см. рис. 9, а).

Длительность ввода первой части энергии (5 % – 615 Дж) на подогревочном токе увеличилась примерно в 2 раза по сравнению с режимом сварки, результаты которого представлены на рис. 9, б. Болт при сварке значительно разогрелся, что объясняется повышенной теплопроводностью стали 35, из которой изготовлен стандартный болт, по сравнению с теплопроводностью стали 20, из которой первоначально изготавливались шляпки под сварку, имитирующие болт. Также немаловажным явилось наличие цинкового покрытия на поверхности болта, что в 2 раза замедлило скорость ввода энергии в межэлектродную зону на подогревочном токе.

Точность сварных соединений аналогична точности соединений, сваренных при базовом режиме (см. рис. 9 и 10). Визуально шляпка болта не сдеформировалась, зазор между шляпкой болта и пластиной составил не более 0,2…0,3 мм по всему периметру контакта. Попадание цинка в контакты при сварке привело к появлению белых пятен на соединении. Дополнительно было проведено прочностное испытание на статическое продавливание болтов (рис. 13).

Разрушение всех трех образцов произошло по кольцевому рельефу по чередующимся участкам взаимного расплавления и твердой фазы (площадь зон взаимного расплавления металла преобладает). Нагрузка, выдержанная сварными соединениями при испытании, составила 23,7; 27,7 и 25,67 кН соответственно.

Таким образом, параметры энергосберегающего режима КРС кронштейнов с использованием системы автоматического управления процессом, приведенные в табл. 2, коррекции не требуют. При испытании на статическое продавливание усилие разрушения образцов, сваренных при указанном режиме, составляет не менее 23 кН.

а) б) в)

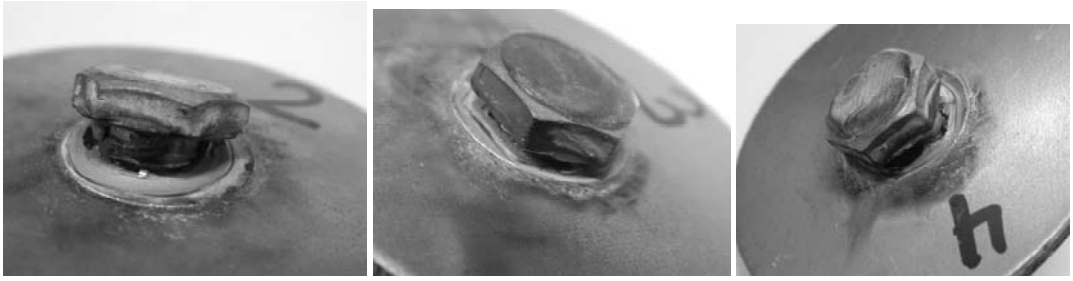


Рис. 13. Разрушенные образцы 1 (а), 2 (б) и 3 (в)

Таким образом, наличие цинкового покрытия на поверхности болтов перед сваркой нежелательно, т. к. увеличивается начальное сопротивление контакта электрод – деталь и ухудшается стабилизация контактных сопротивлений, что увеличивает интервал введения дозированной энергии в межэлектродную зону на начальном этапе процесса и вызывает выплески расплавленного металла из зоны контактов.

Для подтверждения адекватности вывода о влиянии цинкового покрытия болта на процесс КРС кронштейна из стали 20, которую применяли в первоначальных экспериментах, изготовили болт (без покрытия). Затем осуществили сварку кронштейна с помощью спецэлектрода (см. рис. 12) в соответствии с режимом, указанным в табл. 2.

Точность соединения высокая (рис. 14, а). Визуально шляпка болта не сдеформировалась, зазор между шляпкой болта и пластиной составил не более 0,05…0,1 мм по всему периметру контакта. При сварке произошло небольшое шунтирование тока через стержень болта. Утонения шляпки болта не произошло. Фактическая длительность первого и второго импульсов тока составила 0,2 и 0,09 с соответственно, что подтверждает выводы о негативном влиянии цинкового покрытия болта на процесс ввода энергии в межэлектродную зону на начальном этапе процесса.

При испытании на статическое продавливание усилие разрушения образца составило 23,1 кН (рис. 14, б).

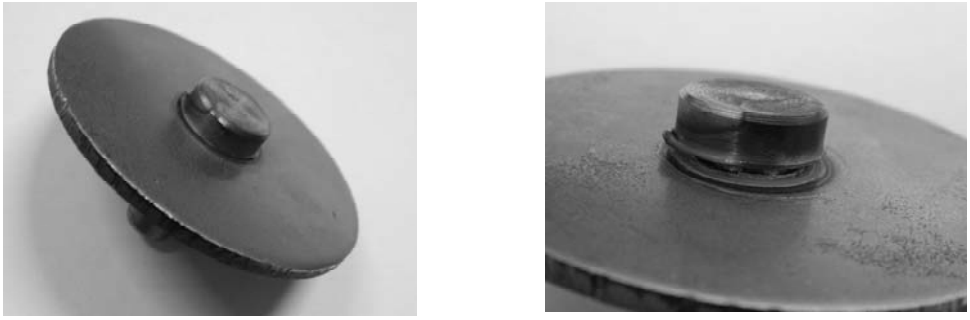


Рис. 14. Сварка пластины (сталь 08кп) с болтом без цинкового покрытия и резьбы (сталь 20)

Затем гальваническим способом с поверхности двух отфрезерованных стандартных болтов М10 × 24 было снято цинковое покрытие, после чего при режиме в соответствии с табл. 2 осуществили КРС кронштейнов (рис. 15, а).

При прочностных испытаниях усилие разрушения образцов составило 23,1 и 27 кН, соответственно. Характер разрушения – по кольцевому рельефу по чередующимся участкам взаимного расплавления и твердой фазы (площадь зон взаимного расплавления металла преобладает) (рис. 15, б, в).

Точность соединений соответствует базовому режиму (см. рис. 9, б и табл. 2).

а) б) в)

Рис. 15. Сварка стандартного болта М10 × 24 без цинкового покрытия (сталь 35) с пластиной (сталь 08кп) (а) и разрушенные образцы (б, в)

Выводы

1. Установлено, что параметры режимов контактной рельефной сварки, рекомендуемые в источниках технической литературы, требуют существенной корректировки с точки зрения энергоэффективности процесса.

2. Разработан высокоэффективный энергосберегающий технологический процесс контактной рельефной сварки кронштейнов лифтов по кольцевым рельефам, позволяющий за счет системы автоматического управления уменьшить в 10 раз количество вводимой электрической энергии в межэлектродную зону по сравнению с режимами, описанными в технической литературе, при соответствующем снижении энергопотребления контактной машины и сохранении 85…95-процентного уровня прочности соединений.

3. Наличие цинкового покрытия на поверхности стандартного болта, привариваемого к пластине, перед сваркой нежелательно, т. к. из-за этого увеличивается начальное сопротивление контакта электрод – деталь и ухудшается стабилизация контактных сопротивлений, что увеличивает интервал введения дозированной энергии в межэлектродную зону на начальном этапе процесса и вызывает выплески расплавленного металла из зоны контактов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гиллевич, В. А.** Технология и оборудование рельефной сварки / В. А. Гиллевич. – Л. : Машиностроение, 1976. – 151 с.

2. **Березиенко, В. П.** Технология сварки давлением / В. П. Березиенко, С. Ф. Мельников, С. М. Фурманов. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2009. – 256 с.

3. Об обеспечении прочности соединений, получаемых способом контактной рельефной сварки, без образования литого ядра / А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, Т. И. Бендик, А. А. Степанов, М. С. Колобова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. – 2016. – № 3. – С. 75–81.

4. Способ контактной точечной и/или рельефной сварки : уведомление о регистрации изобретения под № 19977 от 07.12.2015 г. по заявке № а 20131384 в государственном реестре изобретений (авторы А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, Т. И. Бендик, С. С. Кораткевич, А. О. Булынко).

5. Система автоматического управления процессом рельефной сварки : пат. Респ. Беларусь, МПК B 23 K 11/10 / А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, Т. И. Бендик, С. С. Кораткевич, А. О. Булынко ; заявл. 18.11.13 ; опубл. 30.12.14. – 2014, № 10481 (U). – 5 с.

6. **Поляков, А. Ю.** Система автоматического управления процессом контактной рельефной сварки / А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, Т. И. Бендик // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2013. – № 4. – С. 75–84 .

Статья сдана в редакцию 25 мая 2016 года

Андрей Юрьевич Поляков, канд. техн. наук, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет. E-mail: mortis2008@mail.ru.
Сергей Михайлович Фурманов, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. E-mail: furm@mail.ru.
Алексей Андреевич Степанов, студент, Белорусско-Российский университет. E-mail: ganstapugin@gmail.com.
Мария Сергеевна Колобова, студент, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-333-75-39-66.
Дмитрий Андреевич Денисов, студент, Белорусско-Российский университет. E-mail: fringe.election@gmail.com.

Andrey Yuryevich Polyakov, PhD (Engineering), senior lecturer, Belarusian-Russian University. E-mail: mortis2008@mail.ru.
Sergey Mikhailovich Furmanov, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. E-mail: furm@mail.ru
Aleksei Andreyevich Stepanov, student, Belarusian-Russian University. E-mail: ganstapugin@gmail.com
Mariya Sergeyevna Kolobova, student, Belarusian-Russian University. Phone: +375-333-75-39-66.
Dmitry Andreyevich Denisov, student, Belarusian-Russian University. E-mail: fringe.election@gmail.com.

УДК 621.833.001.24

Н. И. Рогачевский

ТЕОРИЯ ЗАЦЕПЛЕНИЯ ВИТКА АРХИМЕДОВА ЧЕРВЯКА С ЗУБЬЯМИ ДВУХВЕНЦОВОГО КОЛЕСА

UDC 621.833.001.24

N. I. Rogachevsky

THEORY OF ENGAGEMENT OF THE THREAD OF AN ARCHIMEDEAN WORM WITH THE TEETH OF A DOUBLE-RIM WHEEL GEAR

Аннотация

Приведен анализ конструкций червячных передач. Предложены двухвенцовые червячные передачи, содержащие или цилиндрический червяк и два полувенцовых червячных колеса, или два цилиндрических червяка и червячное колесо, оба торца диска которого снабжены зубчатыми венцами, сопряженными с соответствующими червяками, кинематически связанными зубчатой передачей. Получены аналитические зависимости, характеризующие зацепление архимедова червяка с зубьями двухвенцового червячного колеса: уравнения контактных линий на червяке, поверхности зацепления червяка, поперечных и продольных линий зацепления, контактных линий на поверхности зацепления, боковой поверхности зуба червячного колеса и контактных линий на этой поверхности.

Ключевые слова:

передача, архимедов червяк, полувенцовое червячное колесо, геометрические параметры, аналитические зависимости.

Abstract

The analysis of the worm gearing designs is given. Double-rim worm gear sets are studied which contain either a cylindrical worm and two half-rim worm wheels, or two cylindrical worms and a worm wheel, both disk faces of which have toothed rims mating with respective worms, kinematically connected by gear transmission. Analytical dependencies characterizing the engagement of the Archimedean worm with teeth of the double-rim worm gear have been obtained, namely: the equations of contact lines on the worm, the engaging surface of the worm, transverse and longitudinal lines of engagement, contact lines on the engaging surface, the lateral surface of the worm wheel tooth and contact lines on this surface.

Key words:

gear transmission, Archimedean worm, worm gear, geometrical parameters, analytical dependencies.

Введение

В приводах рабочих органов многих технологических и транспортных машин применяют червячные передачи. Эти передачи выгодно отличаются от других механических передач высокой нагрузочной способностью, широким интервалом передаточных чисел, плавностью и бесшумностью работы, возможностью самоторможения. Работа таких передач основана на скольжении со скоростью $V_{ск}$ рабочей поверхности витка червяка по поверхностям зубьев колеса (рис. 1), что является причиной их недостатков. В передаче с традиционными цилиндрическим червяком и колесом большинство контактных линий на указанных поверхностях имеют неблагоприятное направление относительно вектора $V_{ск}$ скорости скольжения (см. рис. 1), что приводит к невыполнению условия обеспечения жидкостного трения в контакте витков червяка с

© Рогачевский Н. И., 2016

зубьями колеса, а соответственно, к низкому значению КПД. Трение принуждает повышать исходную мощность для компенсации энергетических потерь, упрочнять рабочие поверхности и утяжелять червячные передачи.

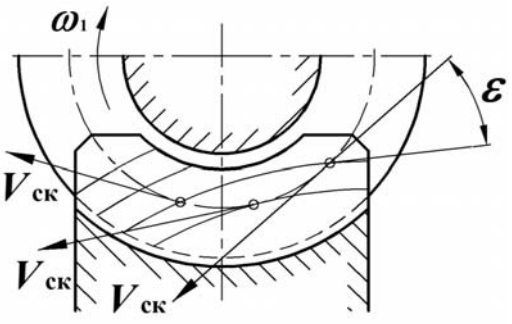


Рис. 1. Положение контактных линий относительно вектора $V_{ск}$ на зубе колеса

Трение обуславливает превращение значительной части (до 40 %) передаваемой передачей энергии в теплоту, которая ухудшает свойства смазочного материала в контакте, увеличивает износ, опасность заедания и вероятность выхода передачи из строя. С целью предотвращения этого предусмотрены оребренные корпуса червячных редукторов и их обдув, дорогие цветные антифрикционные материалы для изготовления зубчатых венцов колес, дорогие противозадирные масла, что, наряду с потерями энергии, повышением напряженного состояния элементов зацепления, также неэффективно. Поэтому невыполнение условия обеспечения жидкостного трения в контакте витков червяка с зубьями колеса снижает качественные показатели червячных передач.

Анализ литературы

В сопряжениях рабочих поверхностей звеньев обычных червячных передач большинство контактных линий расположены так, что среднее по длине контактной линии значение угла ε между касательной к контактной линии и вектором $V_{ск}$ относительной скорости скольжения значительно отличается от 90° (см. рис. 1), что нарушает условие жидкостного трения. Только у контактных линий, кратковременно находящихся в зоне входа в зацепление и выхода из него, значение этого угла достигает лишь 40…50° [1, 2]. Следовательно, чем шире зона расположения контактных линий со значениями угла ε, близкими к 90°, тем ближе условия работы передачи к режиму жидкостного трения, а значит, к более высоким значениям КПД.

Основным из мероприятий, приводящим к увеличению значения угла ε, является модификация обычных червячных зацеплений. Например, известна червячная передача с вырезанной средней зоной зубчатого венца [1]. При этом проточка в средней части зубьев колеса шириной, составляющей около трети ширины венца колеса, и с глубиной, превышающей высоту витка червяка, удаляет зону неблагоприятных углов ε, где скольжение происходит вдоль контактных линий. Такое конструктивное решение способствует улучшению эксплуатационных параметров червячной передачи [1]. Однако это улучшение несущественно, так как выполнение проточки значительно сокращает длину контактных линий и уменьшает контактную и изгибную прочность зубьев червячного колеса [3].

В другой известной модифицированной червячной передаче колесо выполнено полувенцовым, его наибольший

диаметр составляет 1,8...2,0 межосевого расстояния передачи [4]. Такое увеличение наибольшего диаметра червячного колеса приводит к тому, что в работу включается участок с благоприятным углом ε, близким к 90°. Данное обстоятельство способствует переходу от граничного трения рабочих поверхностей витков червяка и зубьев колеса к жидкостному за счет затягиваемого смазочного материала в клиновой зазор между этими поверхностями [3].

Для значительного расширения участка с углом ε между контактными линиями и вектором скорости скольжения, близким к 90°, предложена червячная передача [5], в которой размер наибольшего диаметра колеса больше межосевого расстояния a_w. Это стало возможным благодаря уменьшению рабочей длины червяка b_1 (рис. 2). Передача содержит цилиндрический червяк и два полувенцовых червячных колеса, оси которых отстоят друг от друга на межосевом расстоянии a_w, при этом колеса с обеих сторон обхватывают червяк на угле δ_2 [5]. Полувенцовые червячные колеса размещены симметрично червяку и смещены в окружном направлении друг относительно друга на половину углового шага зубьев. Образующими боковых поверхностей зубьев червячного колеса и витка червяка являются прямые линии, которые при работе передачи совпадают на начальном цилиндре колеса, формируя линию контакта зуба и витка, перпендикулярную вектору скорости их скольжения, что является идеальным для возникновения жидкостного трения и приводит к повышению КПД передачи. При зацеплении других частей зуба с витком червяка расположение линии контакта мало отличается от 90° к вектору скорости скольжения и оказывает незначительное влияние на снижение КПД [5].

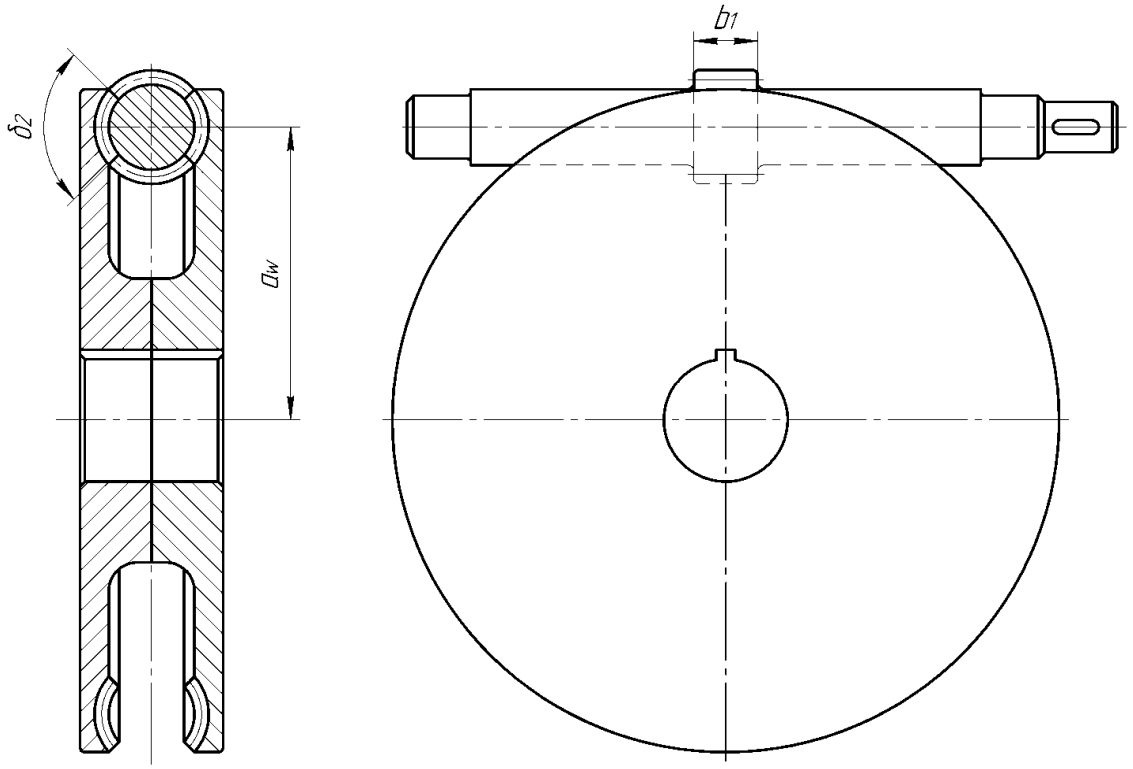


Рис. 2. Передача с двухвенцовым червячным колесом

Двухвенцовая конструкция червячного колеса обусловила большое число его зубьев, находящихся в одновременной работе, в результате чего повысилась, наряду с КПД, нагрузочная способность передачи. Это позволяет выполнить колесо цельным из чугуна вместо составного с дорогостоящим зубчатым венцом из бронзы. Ресурс такой передачи обусловлен усталостной выносливостью червяка, виток которого поочередно зацепляется с каждым зубом обоих венцов червячного колеса [6].

Для увеличения долговечности также разработана двухпоточная червячная передача, в которой оба торца диска червячного колеса снабжены зубчатыми венцами, сопряженными с соответствующими червяками, кинематически связанными зубчатой передачей, имеющими одинаковый шаг, но противоположное направление витков. При этом зубчатые венцы колеса, червяки, углы обхвата червяков зубчатыми венцами колеса симметричны относительно главной плоскости передачи [6]. Редуктор на основе такой передачи может иметь как один входной вал (червяк, кинематически связанный зубчатой передачей со вторым червяком), так и два вала (червяки без кинематической связи, приводимые в движение отдельными двигателями) [6].

К настоящему времени разработаны методика расчета геометрических параметров двухвенцовых червячных передач [7] и теория зацепления эвольвентного червяка с двухвенцовым червячным колесом [8].

На базе вышеуказанных работ спроектирована и изготовлена на РУП «Могилевлифтмаш» опытная двухвенцовая червячная передача для привода фрез культиватора. Передача по габаритам вписывается в существующие корпуса редукторов культиваторов, выпускаемых заводом. Редуктор на основе опытной двухвенцовой червячной передачи имеет параметры: передаточное отношение 20, число заходов червяка 4, число зубьев каждого венца колеса 80, осевой модуль эвольвентного червяка 1,5 мм, a_w = 59,5 мм, диаметр входного вала 16 мм, диаметр выходного вала 21 мм, масло ИТД-220. Эвольвентный червяк передачи, фреза для нарезания двухвенцовых червячных колес, двухвенцовые червячные колеса в сборе и зацепление звеньев передачи опытного редуктора культиватора представлены на рис. 3 и 4.

Сравнительные испытания редукторов культиваторов на основе традиционной и двухвенцовой эвольвентных червячных передач показали преимущества последней как по КПД, так и по нагрузочной способности. При частоте вращения червяка 1400 мин$^{-1}$ и изменении крутящего момента на нем в пределах 5…10 Н·м КПД модернизированного редуктора составил 68,2…74,6 %, в то же время значения КПД традиционного редуктора не доходили до 50 % [8]. Однако дальнейшее повышение КПД редукторов на базе двухвенцовых червячных передач и внедрение их в производство сдерживаются отсутствием научно обоснованного проектирования таких передач с архимедовым червяком, которое основывается на теории зацепления их звеньев. Последняя до настоящего времени не была разработана.

Теория зацепления звеньев двухвенцовой архимедовой червячной передачи

Целью работы является создание теории зацепления витка архимедова червяка с зубьями двухвенцового червячного колеса. Теоретические зависимости, характеризующие двухвенцовое червячное зацепление, получим точными методами геометрии, кинематики и математического анализа.

Рис. 3. Червяк передачи, фреза для нарезания двухвенцовых червячных колес, двухвенцовые червячные колеса в сборе, подготовленные для испытаний

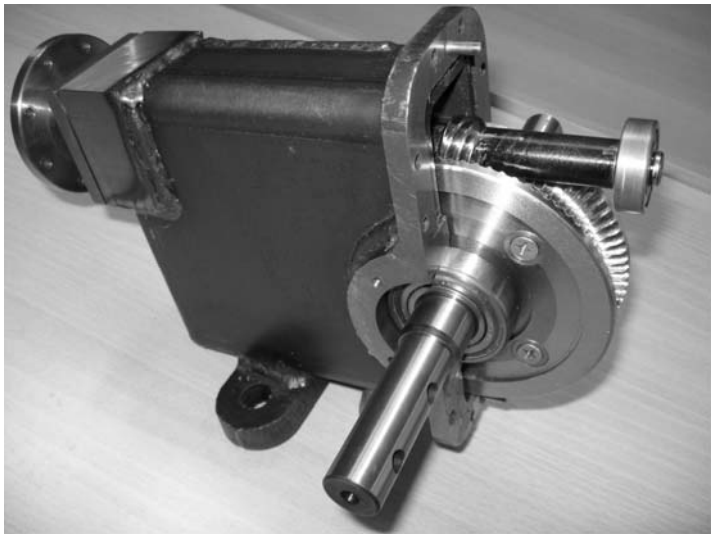


Рис. 4. Двухвенцовая червячная передача в составе редуктора культиватора

Рассмотрим теоретическую картину зацепления зуба колеса с витком архимедова червяка. Для вывода уравнения винтовой поверхности архимедова червяка, так же как и эвольвентного, используем метод преобразования координат из одной системы в другую, отражающий в себе способ воспроизведения поверхности движением прямолинейной или криволинейной режущей кромки инструмента [9]. Архимедова винтовая поверхность воспроизводится винтовым движением прямой АБ, пересекающей ось винтового движения Oz_1 (рис. 5). На рис. 5 изображена неподвижная система осей x_1, y_1, z_1. Прямая АБ совершает винтовое движение вокруг оси Oz_1. Линия АБ жестко связана с системой осей x_0, y_0, z_0. Прямая АБ лежит в плоскости $x_0Бz_0$ и составляет с осью $Бy_0$ угол образующей α (угол профиля). Ось $Бz_0$ направлена по оси Oz_1. В начальный момент движения ось $Бx_0$ совпадает с осью Ox_1, а ось $Бy_0$ – с осью Oy_1. Угловое положение системы x_0, y_0, z_0 относительно системы x_1, y_1, z_1 характеризует угол поворота v, который является угловым параметром винтового движения образующей прямой АБ боковой поверхности витка червяка. Осевой параметр винтового движения k связан с ходом архимедовой винтовой поверхности p_z зависимостью

$$k = p_z / (2\pi) = m\pi / (2\pi) = 0{,}5m.$$

Уравнение образующей прямой АБ винтовой теоретической поверхности в системе координат x_0, y_0, z_0 очевидно из рассмотрения построения схемы, изображенной на рис. 5.

$$\left.\begin{aligned} z_0 / y_0 &= \operatorname{tg}\alpha; \\ x_0 &= 0. \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

Из рис. 5 видно также, что система координат x_0, y_0, z_0 отличается от x_1, y_1, z_1 поворотом на угол v и сдвигом вдоль оси Oz_1 на величину kv, поэтому соотношения между координатами x_0, y_0, z_0 и x_1, y_1, z_1 имеют вид:

$$\left.\begin{aligned} x_0 &= x_1 \cos v - y_0 \sin v; \\ y_0 &= x_1 \sin v + y_1 \cos v; \\ z_0 &= z - kv. \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

Подставляя в уравнения (2) вместо x_0, y_0, z_0 их выражения (1), получаем после преобразований уравнения архимедовой винтовой поверхности

$$\left.\begin{aligned} & x_1 \cos v - y_1 \sin v = 0; \\ & x_1 \sin v \operatorname{tg}\alpha + y_1 \cos v \operatorname{tg}\alpha + z_1 = 0{,}5mv. \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

Уравнения (3) математически описывают архимедову винтовую поверхность правого направления (показана на рис. 5), для левой поверхности в эти уравнения вместо α необходимо подставить $-\alpha$.

Изложенная теория зацепления архимедовой винтовой поверхности червяка с соответствующей поверхностью зуба венца двухвенцового червячного колеса построена на положении (равносильном закону зацепления), что сопряженные поверхности есть огибаемая и огибающая в относительном движении звеньев. Для определения огибаемой поверхности и ее характеристик используем общий аналитический метод, разработанный Н. И. Колчиным и примененный им для исследования червячного зацепления с произвольным углом между осями и аналитического обоснования способа нарезания цилиндрических зубчатых колес по методу Пфаутера [10, 11].

Схема относительного расположения звеньев двухвенцовой червячной передачи представлена на рис. 6, на котором обозначены: x_1, y_1, z_1 – система координат, связанная с червяком; x_2, y_2, z_2 – система координат, скрепленная с полувенцом червячного колеса; x, y, z – неподвижная система координат; x', y', z' – вспомогательная неподвижная координатная система, сдвинутая относительно системы x, y, z вдоль оси y на межосевое расстояние a_w; φ_1 и φ_2 – углы поворота червяка и червячного колеса, соотношение которых является передаточным отношением $i = \varphi_2 / \varphi_1$.

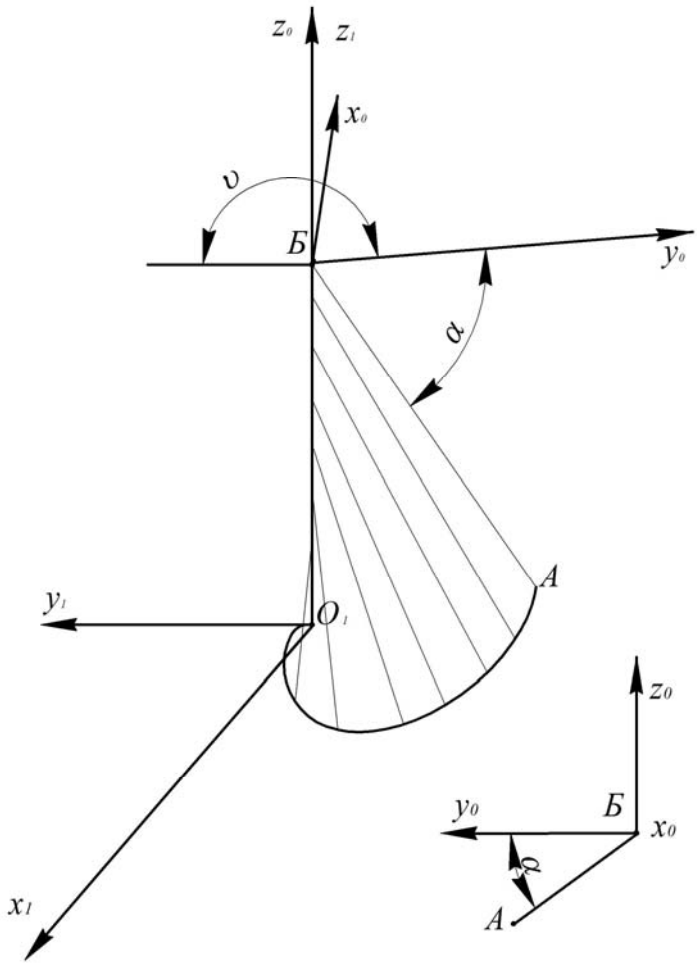


Рис. 5. Схема образования архимедовой винтовой поверхности червяка

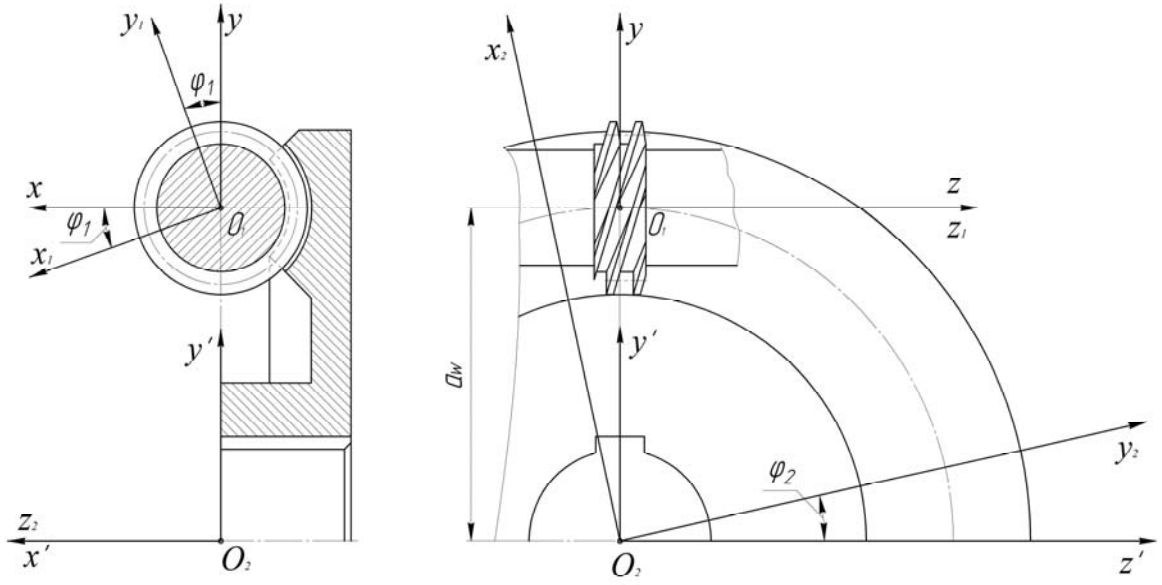


Рис. 6. Схема зацепления архимедова червяка с зубьями венца колеса двухвенцовой червячной передачи

Система координат x_1, y_1, z_1 отличается от x, y, z поворотом на угол φ_1, поэтому соотношения между координатами x, y, z и x_1, y_1, z_1 имеют вид [10, 12]:

– при переходе от x_1, y_1, z_1 к x, y, z

$$\left.\begin{aligned} x &= x_1\cos\varphi_1 + y_1\sin\varphi_1; \\ y &= -x_1\sin\varphi_1 + y_1\cos\varphi_1; \\ z &= z_1; \end{aligned}\right\} \quad (4)$$

– при переходе от x, y, z к x_1, y_1, z_1

$$\left.\begin{aligned} x_1 &= x\cos\varphi_1 - y\sin\varphi_1; \\ y_1 &= x\sin\varphi_1 + y\cos\varphi_1; \\ z_1 &= z. \end{aligned}\right\} \quad (5)$$

Система осей x_2, y_2, z_2 отличается от x_1, y_1, z_1 переносом начала координат на межосевое расстояние a_w и поворотом на угол φ_2 вокруг оси z_2. Для получения формул преобразования, учитывающих эти относительные перемещения указанных систем координат, и введена вспомогательная система x', y', z'. Производя переход от системы координат x, y, z к x_2, y_2, z_2 в два этапа: сперва перенос начала координат на межосевое расстояние a_w, затем поворот на угол φ_2, получаем формулы для перехода от координат x, y, z к x_2, y_2, z_2

$$\left.\begin{aligned} x_2 &= y\cos\varphi_2 - z\sin\varphi_2 + a_w\cos\varphi_2; \\ y_2 &= y\sin\varphi_2 + z\cos\varphi_2 + a_w\sin\varphi_2; \\ z_2 &= x. \end{aligned}\right\} \quad (6)$$

Аналогично для перехода от системы x_2, y_2, z_2 к x, y, z имеем

$$\left.\begin{aligned} x &= z_2; \\ y &= x_2\cos\varphi_2 + y_2\sin\varphi_2 - a_w; \\ z &= -x_2\sin\varphi_2 + y_2\cos\varphi_2. \end{aligned}\right\} \quad (7)$$

Подставляя в формулы (6) значения x, y, z по формулам (4), получаем формулы перехода от x_1, y_1, z_1 к x_2, y_2, z_2 в следующем виде:

$$\left.\begin{aligned} x_2 &= -x_1\sin\varphi_1\cos\varphi_2 + y_1\cos\varphi_1\cos\varphi_2 - \\ &- z_1\sin\varphi_2 + a_w\cos\varphi_2; \\ y_2 &= -x_1\sin\varphi_1\sin\varphi_2 + y_1\cos\varphi_1\sin\varphi_2 + \\ &+ z_1\cos\varphi_1 + a_w\sin\varphi_2; \\ z_2 &= x_1\cos\varphi_1 + y_1\sin\varphi_1. \end{aligned}\right\} \quad (8)$$

Подставляя в формулы (5) значения x, y, z по формулам (7), имеем зависимости перехода от осей x_2, y_2, z_2 к осям x_1, y_1, z_1

$$\left.\begin{aligned} x_1 &= -x_2\sin\varphi_1\cos\varphi_2 - y_2\sin\varphi_1\sin\varphi_2 + \\ &+ z_2\cos\varphi_1 + a_w\sin\varphi_1; \\ y_1 &= x_2\cos\varphi_1\cos\varphi_2 + y_2\cos\varphi_1\sin\varphi_2 + \\ &+ z_2\sin\varphi_1 - a_w\cos\varphi_1; \\ z_1 &= -x_2\sin\varphi_2 + y_2\cos\varphi_2. \end{aligned}\right\} \quad (9)$$

Вспомогательными формулами для исследования зацепления являются частные производные $\partial x_1/\partial\varphi_1$, $\partial y_1/\partial\varphi_1$, $\partial z_1/\partial\varphi_1$, рассматривая в них координаты x_1, y_1, z_1 в функции от x_2, y_2, z_2 по формулам преобразования (9), и частные производные $\partial x_2/\partial\varphi_1$, $\partial y_2/\partial\varphi_1$, $\partial z_2/\partial\varphi_1$, рассматривая в них x_2, y_2, z_2 как функции от x_1, y_1, z_1 по формулам преобразования (8). Геометрический смысл этих производных следующий. Производные $\partial x_1/\partial\varphi_1$, $\partial y_1/\partial\varphi_1$, $\partial z_1/\partial\varphi_1$ после умножения их на $d\varphi_1$ представляют проекции на оси x_1, y_1, z_1 элементарного вектора перемещения точки, лежащей на поверхности зубцов колеса, при повороте червяка на угол $d\varphi_1$. Производные $\partial x_2/\partial\varphi_1$, $\partial y_2/\partial\varphi_1$, $\partial z_2/\partial\varphi_1$ после умножения их на $d\varphi_1$ представляют проекции на оси x_2, y_2, z_2 элементарного вектора перемещения точки, лежащей на поверхности зубцов червячного колеса, при повороте червяка на угол $d\varphi_1$.

Дифференцируя уравнения (9), получим

$$\left.\begin{aligned}
&\partial x_1/\partial\varphi_1 = -x_2(\cos\varphi_1\cos\varphi_2 - i\sin\varphi_1\times\\
&\times\sin\varphi_2) - y_2(\cos\varphi_1\sin\varphi_1 + i\sin\varphi_1\times\\
&\times\cos\varphi_2) - z_2\sin\varphi_1 + a_w\cos\varphi_1;\\
&\partial y_1/\partial\varphi_1 = -x_2(\sin\varphi_1\cos\varphi_2 + i\cos\varphi_1\times\\
&\times\sin\varphi_2) - y_2(\sin\varphi_1\sin\varphi_2 - i\cos\varphi_1\times\\
&\times\cos\varphi_2) + z_2\cos\varphi_1 + a_w\sin\varphi_1;\\
&\partial z_1/\partial\varphi_1 = -i(x_2\cos\varphi_2 + y_2\sin\varphi_2),
\end{aligned}\right\} \quad (10)$$

где i – передаточное отношение, $i = \partial\varphi_2/\partial\varphi_1$.

Подставим в уравнения (10) вместо x_2, y_2, z_2 их значения через x_1, y_1, z_1 по формулам (8). После многочисленных тригонометрических и алгебраических преобразований уравнения (10) примут следующий вид:

$$\left.\begin{aligned}
&\partial x_1/\partial\varphi_1 = -y_1 - z_1 i\sin\varphi_1;\\
&\partial y_1/\partial\varphi_1 = x_1 + z_1 i\cos\varphi_1;\\
&\partial z_1/\partial\varphi_1 = i(x_1\sin\varphi_1 - y_1\cos\varphi_1 - a_w).
\end{aligned}\right\} \quad (11)$$

Аналогично дифференцируем формулы (8), затем подставляем вместо x_1, y_1, z_1 их значения по соотношениям (9). После тригонометрических и алгебраических преобразований полученные уравнения примут вид:

$$\left.\begin{aligned}
&\partial x_2/\partial\varphi_1 = -y_2 i - z_2\cos\varphi_2;\\
&\partial y_2/\partial\varphi_1 = x_2 i - z_2\sin\varphi_2;\\
&\partial z_2/\partial\varphi_1 = x_2\cos\varphi_2 + y_2\sin\varphi_2 - a_w).
\end{aligned}\right\} \quad (12)$$

Архимедово червячное зацепление, так же как и эвольвентное, характеризуют уравнения контактных линий на червяке, поверхности зацепления червяка, поперечных и продольных линий зацепления, контактных линий на поверхности зацепления, боковой поверхности зуба червячного колеса и контактных линий на этой поверхности. Получим данные уравнения.

Чтобы вывести уравнения контактных линий на червяке, необходимо к основным уравнениям (3) поверхности витка червяка добавить зависимость, полученную дифференцированием по φ_1 соотношений (3). После дифференцирования находим в каждой из двух полученных зависимостей $\partial v/\partial\varphi_1$, а затем приравниваем их правые части. После преобразований

$$\left(\frac{\partial x_1}{\partial\varphi_1}\sin v\,\mathrm{tg}\,\alpha + \frac{\partial y_1}{\partial\varphi_1}\cos v\,\mathrm{tg}\,\alpha + \frac{\partial z_1}{\partial\varphi_1}\right)\times$$
$$\times\ \left(x_1\sin v + y_1\cos v\right) =$$
$$= 0{,}5m\left(\frac{\partial x_1}{\partial\varphi_1}\cos v - \frac{\partial y_1}{\partial\varphi_1}\sin v\right). \quad (13)$$

Подставляя в это уравнение значения производных $\partial x_1/\partial\varphi_1$, $\partial y_1/\partial\varphi_1$, $\partial z_1/\partial\varphi_1$ из соотношений (11), после многочисленных преобразований искомая добавочная к уравнениям (3) зависимость, математически описывающая контуры контактных линий на червяке,

$$x_1\sin\varphi_1 - y_1\cos\varphi_1 + z_1(\cos(\varphi_1 + v)\times$$
$$\times\,\mathrm{tg}\,\alpha + (0{,}5m\sin(\varphi_1 + v))/(x_1\sin\varphi_1 +$$
$$+\ y_1\cos\varphi_1)) = a_w. \quad (14)$$

Подставляя в уравнения (3) и (14) вместо x_1, y_1, z_1 выражения из формул преобразования (5), после тригонометрических и алгебраических преобразований уравнения поверхности зацепления архимедова червяка

$$\left.\begin{aligned}
&x\cos(\varphi_1 + v) - y\sin(\varphi_1 + v) = 0;\\
&x\sin(\varphi_1 + v)\,\mathrm{tg}\,\alpha + y\cos(\varphi_1 + v)\times\\
&\times\,\mathrm{tg}\,\alpha + z = 0{,}5mv;\\
&-y + z(\cos(\varphi_1 + v)\,\mathrm{tg}\,\alpha +\\
&+\ (0{,}5m\sin(\varphi_1 + v))/(x\sin(\varphi_1 + v) +\\
&+\ y\cos(\varphi_1 + v))) = 0.
\end{aligned}\right\} \quad (15)$$

Линии на поверхности зацепления, отвечающие постоянным значениям φ_1, но различным v, будут контактными линиями на поверхности зацепления. Уравнения (13) могут служить для вычисления координат сечений поверхности зацепления плоскостями z = const, т. е. поперечных линий зацепления, задаваясь произвольными значениями

суммы $(\varphi_1 + v)$.

Для получения линий зацепления в виде сечений поверхности зацепления плоскостями x = const (продольные линии зацепления) нужно первое и последнее из уравнений (15) решить относительно y и z:

$$\left.\begin{aligned} & y = x\mathrm{ctg}(\varphi_1 + v); \\ & z = (a_w + x\mathrm{ctg}(\varphi_1 + v)): \\ & :(\cos(\varphi_1 + v)\,\mathrm{tg}\,\alpha + \\ & + (0,5m\sin^2(\varphi_1 + v))/x). \end{aligned}\right\} \quad (16)$$

Для получения координат контактных линий на поверхности зацепления нужно все три уравнения (15) решить относительно z, y, x:

$$\left.\begin{aligned} & z = 0,5mv - y\,\mathrm{tg}\,\alpha/\cos(\varphi_1 + v); \\ & y^2 - y(0,5m\sin\alpha\cos\alpha(v\cos(\varphi_1 + \\ & + v) - \sin(\varphi_1 + v)) - a_w\cos^2\alpha) - \\ & - 0,25m^2 v\sin(\varphi_1 + v)\cos(\varphi_1 + v)\times \\ & \times\ \cos^2\alpha = 0; \\ & x = y\,\mathrm{tg}(\varphi_1 + v). \end{aligned}\right\} \quad (17)$$

Подставляя значения z, y, x в уравнения (6) перехода от осей x, y, z к осям x_2, y_2, z_2, имеем уравнения поверхности зубцов колеса, причем точки этой поверхности, отвечающие одному и тому же значению параметров φ_1 и φ_2, но разным v, будут представлять собой контактные линии на поверхности зубцов колеса.

Заключение

Выведенные уравнения поверхности зацепления червяка, поперечных и продольных линий зацепления, контактных линий на поверхности зацепления, боковой поверхности зуба червячного колеса и контактных линий на этой поверхности будут использованы для научно обоснованного задания геометрических параметров двухвенцовых червячных передач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Решетов, Д. Н.** Детали машин / Д. Н. Решетов. – М.: Машиностроение, 1989. – 496 с.

2. **Левитан, Ю. В.** Червячные редукторы : справочник / Ю. В. Левитан, В. П. Обморнов, В. И. Васильев. – Л. : Машиностроение ; Ленингр. отделение, 1985. – 168 с.

3. **Егоров, И. М.** Цилиндро-тороидная червячная передача / И. М. Егоров // Зубчатые передачи – 99 : тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. по проблеме обеспечения надежности и качества зубчатых передач. – СПб., 1999. – С. 22–23.

4. Червячная цилиндрическая передача : пат. 2136987 РФ, МПК^6 F 16 H 1/16 / И. М. Егоров, Б. Ш. Иофик (РФ). – № 99103702/28 ; заявл. 03.03.99 ; опубл. 10.09.99. – 8 с.

5. Червячная передача : пат. 7773U Респ. Беларусь, МПК F 16 H 1/00 / В. И. Сотников, Н. Г. Чернов, М. Э. Подымако, Н. И. Рогачевский, М. Ф. Пашкевич ; заявитель РУП «Завод «Могилевлифтмаш». – № u20110389 ; заявл. 18.05.11 ; опубл. 30.12.11 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 6 (83). – С. 247.

6. Червячная передача : пат. 8694U Респ. Беларусь, МПК F 16 H 1/00 / С. Н. Рогачевский, М. Ф. Пашкевич, Н. И. Рогачевский ; заявитель Белорус.-Рос. ун-т. – № u20120366 ; заявл. 02.04.12 ; опубл. 30.10.12 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 5 (88). – С. 224.

7. **Рогачевский, Н. И.** Геометрия двухвенцовых червячных передач / Н. И. Рогачевский, М. Э. Подымако, С. Н. Рогачевский // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2014. – С. 83–84.

8. **Рогачевский, Н. И.** Теория зацепления звеньев двухвенцовых червячных передач / Н. И. Рогачевский // Вестн. ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2014. – № 4. – С. 3–11.

9. **Рогачевский, Н. И.** Теоретическая поверхность зуба зубчатого колеса, нарезанного архимедовой червячной фрезой / Н. И. Рогачевский ; ММИ. – Могилев, 1981. – 33 с. – Деп. в БелНИИНТИ 22.04.81, № 262.

10. **Колчин, Н. И.** Червячное зацепление с произвольным углом между осями / Н. И. Колчин // Зубчатые зацепления : сб. науч. ст. – М. : Машгиз, 1947. – С. 6–7.

11. **Колчин, Н. И.** Аналитическое обоснование способа нарезания цилиндрических зубчатых колес по методу Пфаутера / Н. И. Колчин // Зубчатые зацепления : сб. науч. ст. – М. : Машгиз, 1947. – С. 48–50.

12. **Гусак, А. А.** Аналитическая геометрия и линейная алгебра : справ. пособие по решению задач / А. А. Гусак. – Минск : ТетраСистемс, 2001. – 288 с.

Статья сдана в редакцию 30 июня 2016 года

Николай Иванович Рогачевский, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-293-60-35-93.

Nikolai Ivanovich Rogachevsky, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-293-60-35-93.

УДК 621.926

Л. А. Сиваченко, Т. Л. Сиваченко

УПРАВЛЯЕМЫЕ ВИБРАЦИОННЫЕ МАШИНЫ И ТЕХНОЛОГИИ – ОСНОВА СОЗДАНИЯ НОВОЙ ОТРАСЛИ ПРОМЫШЛЕННОСТИ – ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

UDC 621.926

L. A. Sivachenko, T. L. Sivachenko

CONTROLLED VIBRATORY MACHINES AND TECHNOLOGIES AS THE BASIS FOR CREATING A NEW INDUSTRY – PROCESSING MACHINE-BUILDING

Аннотация

Изложены основные задачи инновационного развития в области комплексной переработки сырья и материалов и обоснованы механизмы выявления его потенциала. Представлена энерготехнологическая концепция национальной безопасности и описаны основы создания управляемых вибрационных машин и технологий с практическими примерами некоторых из них. Обоснована необходимость в новой отрасли отечественной промышленности – технологическом машиностроении – и предложены организационно-структурные мероприятия по её формированию.

Ключевые слова:

вибрационные машины, управляемые технологии, технологическое машиностроение, измельчение, энергосбережение, модернизация промышленности, технологический уклад, инновационное развитие, энергетический поток, комплексы машин, мировая экономика.

Abstract

The paper gives the basic tasks of innovative development in the field of complex processing of raw materials and substantiates the mechanisms identifying its potential. For that, the energotechnological concept of national security is presented and the basics of creating controlled vibratory machines and technologies are described with practical examples of some of them. The necessity of a new domestic industry, namely processing machine-building, is substantiated and organizational and structural activities for its formation are proposed.

Key words:

vibratory machines, controlled technologies, processing machine-building, grinding, energy saving, modernization of industry, technological structure, innovative development, flow of energy, complexes of machines, world economy.

Постановка задачи

Технологические машины предназначены для изменения объектов путём преобразования материалов. В свою очередь, эти машины осуществляют некий процесс, итоговой целью которого является придание материальным объектам таких качеств и характеристик, которые интересуют человека. Сегодня это самые затратные статьи общественного производства, их доля только в энергетическом балансе стран составляет 50…55 % всей вырабатываемой электроэнергии и 35…38 % всех остальных видов энергоресурсов [1].

Проблемы технологического развития при этом обусловлены дефицитом энергии, выработкой и обеднением многих природных ресурсов, экологической неустойчивостью, нехваткой производственных и интеллектуальных возможностей и рядом других негативных факторов. К их числу в первую очередь следует отнести тот неоспоримый факт,

© Сиваченко Л. А., Сиваченко Т. Л., 2016

что основные идеи, заложенные в технологии переработки сырья и материалов, разработаны ещё в XIX – начале XX вв. [1, 2].

Фатальный характер сложившейся ситуации заключается в том, что разработанные в то время машины и агрегаты и сегодня являются не только самыми крупными из всех созданных людьми, но и самыми несовершенными, т. к. принцип их действия соответствует знаниям того времени. Описываемая авторами область деятельности и на сегодняшний день не стала развиваться в направлении высоких технологий и здравого смысла, т. к. занявшим производственную нишу фирмам-производителям невыгодно изменять номенклатуру продукции и создавать принципиально новые объекты техники, иначе они теряют своё место на рынке и несут убытки.

Следует также отметить, что современное производство требует создания не отдельных машин и агрегатов, а высокоэффективных комплексов, каждое из звеньев которых выполняет определённые функции с максимальной эффективностью. Парадокс при этом состоит в необходимости огромных инвестиций на проведение исследований и разработок, которые зачастую разбиваются о стены чиновничьего невежества и профессиональной безграмотности ряда специалистов. Характерный этому пример – провал цементной промышленности Беларуси, когда в угоду китайским кредиторам построены три новых завода, а два старых закрыты. Новые работают хуже старых, а виновных не найти.

Для обоснования приведём графическую модель смены технологических укладов для различных отраслей народного хозяйства (рис. 1).

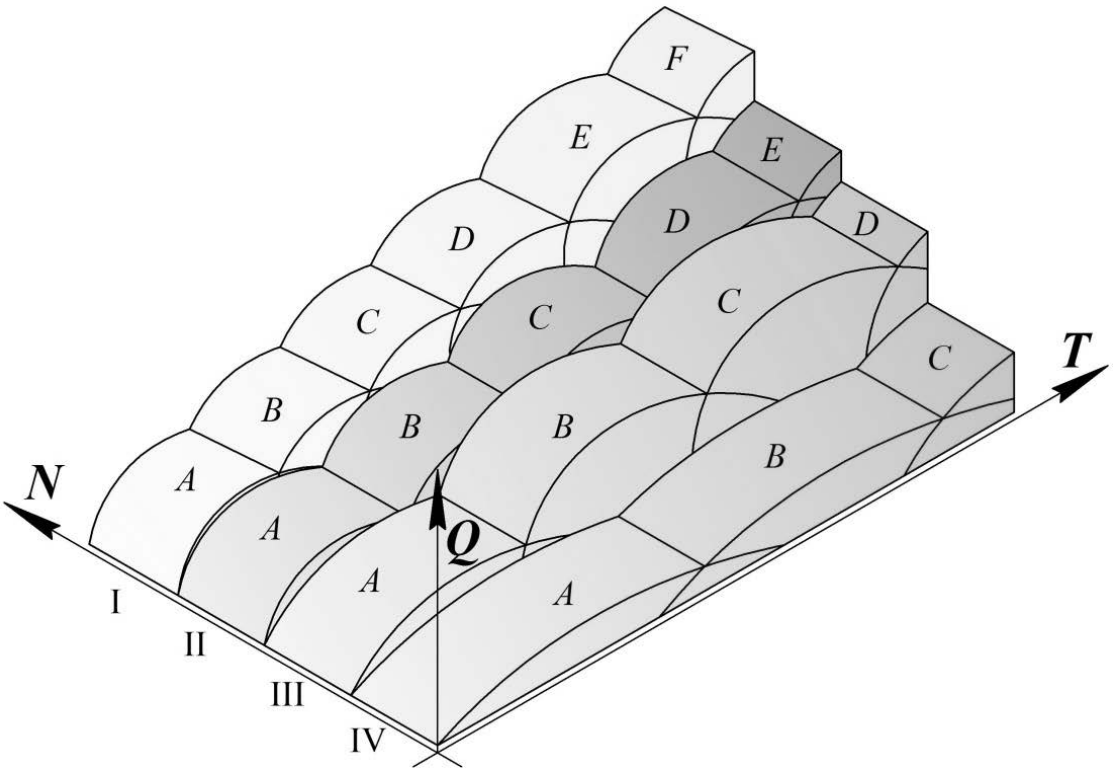


Рис. 1. Графическая модель смены технологических укладов для различных отраслей народного хозяйства

Условно разделим их на четыре группы и будем характеризовать по уровню эффективности Q. К первой группе следует отнести самые передовые отрасли, имеющие тенденции перехода на 6 технологический уклад, ко второй – достаточно продвинутые отрасли, находящиеся на 5 укладе, к третьей – недостаточно развитые, отличающиеся низкой эффективностью и требующие срочных инноваций. Особо следует выделить четвертую группу производств – это так называемые предприятия сырьевой направленности и первых стадий переработки. Используемые здесь принципы функционирования не только архаичны, но и крайне неэффективны, что не позволяет их оценку поднять выше третьего технологического уклада.

Экономика России включает в себя весь спектр технологических укладов, причём к первой группе отраслей следует отнести космическую, атомную и военную. В экономике Беларуси отрасли высшего уклада отсутствуют. Это положение необходимо учитывать в долгосрочных планах развития. Если при этом на графическую модель наложить совокупные издержки, необходимые для функционирования соответствующих отраслей, то они будут зеркально противоположны их уровню развития. Иными словами, четвёртая группа отраслей или производств является самой затратной (см. рис. 1).

Прежде всего следует отметить, что соответствующее 4-й группе отраслей состояние характерно для всей мировой экономики. Поясним это на примере. Если при помоле материалов на процесс расходуется до 10 % всей производимой электроэнергии при КПД мельниц около 1 % [3], а наука реально оценивает потенциал энергоэффективности минимум в 1 порядок, то необходимость технологической революции здесь более чем очевидна.

Таким образом, технологическая сфера производства, связанная с переработкой сырья и материалов, относится к самой отсталой и затратной из всех, используемых в промышленности. Ситуация в целом аналогична для всех стран, даже самых развитых, что дает основания предсказывать неизбежный прорыв в этой области и предоставляет Беларуси шанс войти в число стран-лидеров мирового развития. Практические действия в этом направлении необходимо начинать уже сегодня.

Обоснование механизмов выявления потенциала технологического развития

В качестве исходных условий при решении поставленных задач будем считать поиск и оценку источников технологического потенциала в добывающих и перерабатывающих отраслях народного хозяйства. Речь идет о переработке и преобразовании различных материалов для получения новой продукции. Это необходимо делать именно по той причине, что это основной и наиболее определяющий этап энергоэффективности, т. к. именно здесь совершается наибольшая работа и производится целевой продукт.

Идеологической базой в основе подходов авторов является энерготехнологическая концепция национальной безопасности (ЭТК). Суть ЭТК заключается в межотраслевом анализе технологических стадий производства, выборе наиболее значимых из них по уровню энергозатратности и оценке по критерию потенциала практической реализации с возможностью оптимального решения. Принципиальной позицией ЭТК как методологической основы является тот факт, что Беларусь из «догоняющих» стран должна перейти в разряд государств со смешанным типом технологического развития, когда в структуре промышленности, например, будут присутствовать сегменты собственных технологий мирового уровня, как это имеет место в Финляндии, Чехии или Израиле, при заимствовании остальной

их части [4]. Для России этот формат должен быть значительно шире и охватывать целые отрасли.

Под понятием собственно «энерготехнологическая концепция» следует понимать системный анализ, организацию, создание, функционирование и совершенствование методов, средств и систем создания новых материалов, технологий, оборудования, производственных комплексов и продукции жизнедеятельности на условиях минимального энерго- и ресурсопотребления, высокой конкурентоспособности и экологичности. Основная задача концепции – предложить новые механизмы модернизации отечественной экономики [5].

Сформулируем структуру энерготехнологической концепции. По сути, это усовершенствованная методология, которая хорошо известна специалистам. Принципиально новым здесь является вскрытие таких резервов производства, которые ранее в научных и плановых кругах не рассматривались, а также их межотраслевой анализ и учёт. Обобщённая структура ЭТК приведена на рис. 2.

Рис. 2. Структура энерготехнологической концепции национальной безопасности

Современную экономику можно образно определить тем, что производится, как производится и как реализуется основная часть валового продукта. До сих пор перерабатываются огромные объемы материала с очень низкой эффективностью ее преобразования в конечный продукт, а на соответствующие им технологические переделы расходуется огромное количество энергии, материальных ресурсов и человеческого труда. Именно по этим причинам продукция нашей страны недостаточно конкурентна на мировом рынке.

Характер обработки материалов определяет технологию проведения

процессов и конструктивное исполнение оборудования. В итоге имеем сложнейшие системы, целостное описание которых аналитическими подходами сегодня невозможно. Работу крупных машин трудно моделировать, а тем более проводить апробацию новых технических решений. Рынок технологического оборудования захвачен очень крупными компаниями, их продукция во многих случаях – целые заводы, к примеру, цементные. На такой рынок можно войти только путём существенных нововведений и концентрации всех ресурсов.

Хорошо известно, что очень многие технологии, процессы и оборудование, основанные на единых принципах функционирования, широко используются в различных отраслях промышленности для переработки многих видов материалов и решения специфических технологических задач. Широкой совместимостью характеризуются такие процессы, как измельчение, сушка, обжиг, гранулирование, классификация, прессование и ряд других, а также их соответствующая совокупность. Этот список можно дополнить многими десятками других процессов [6, 7]. Отсюда вывод – необходима широкая межотраслевая научная кооперация и межведомственный подход к решению этих проблем.

В своих оценках технологического потенциала будем руководствоваться только частью производственных стадий или переделов, к их числу относятся первичная переработка сырья, дезинтеграторные технологии, тепловые переделы, технологическое ресурсосбережение, рудоподготовка, переработка отходов, технологический электропривод и технологическое энергосбережение [8].

Научной основой выдвигаемых авторами положений являются достижения таких фундаментальных дисциплин, как современное материаловедение, вибрационная механика, термодинамика, механика сплошной среды, комплексное моделирование, тепло- и массообмен и ряд других для создания принципиально новых технологических машин и оборудования, обеспечивающих переход к широкому внедрению управляемых технологий, способных кардинально улучшить работу большинства промышленных предприятий и обеспечить выход отечественной промышленности на новый технологических уровень.

Основы создания управляемых вибрационных машин и технологий

Внешнее воздействие на обрабатываемый материал приводит к изменению свойств этого материала в динамике. Для этих целей широко используются силовые поля: механические, тепловые, электрические, магнитные, электромагнитные, радиационные, вещественные и комбинированные [6]. Основанные на них технологические процессы можно разделить на следующие базовые группы: механические, гидромеханические, тепловые и массообменные, химические. Научные интересы, затрагивая три первые из этих групп, основаны на использовании адаптивных методов воздействия на обрабатываемые материалы. Это, в частности, оборудование с кинематически деформируемыми элементами или с дополнительными степенями свободы движения рабочих органов, собственно вибрационные установки или технологии, основанные на вибрационных принципах, машины ударного действия, комбинированные агрегаты для механотермической обработки материалов, некоторые новые технологические эффекты и ряд других.

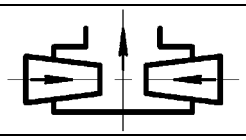
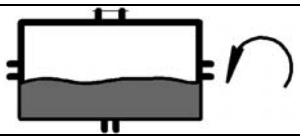
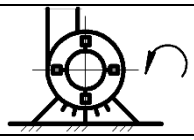
При проведении любой технологической операции требуется эффективно использовать необходимую для этих целей энергию. Энерготехнологический алгоритм действий включает в себя получение, передачу, преобразование, использование и утилизацию энер-

гии. За каждой из этих стадий стоит соответствующий дорогостоящий агрегат, неизбежны дополнительные потери и эксплуатационные издержки.

Уникальность собственно вибрационных машин и технологии заключается в их способности периодически накапливать энергию и затем в кратковременный период времени вводить её в обрабатываемую среду. Это коренным образом влияет на характер происходящих в ней изменений и является важнейшим условием создания управляемых технологий, например, при производстве бетона. Вопросы технологической вибротехники достаточно предметно освещены в [9–12].

Заслуживает внимания структурный анализ измельчительных агрегатов в части трансформаций и ввода энергии в обрабатываемую среду. На нескольких примерах (табл. 1) покажем механизмы управления энергетическими потоками для различных измельчительных машин. В некотором приближении здесь уместно традиционное определение КПД, как к примеру, КПД привода.

Табл. 1. Примеры структурного анализа технологических аппаратов

Структура аппаратов			
Струйная мельница	Шаровая мельница	Молотковая мельница	Виброударные мельницы
			
Силовая установка ↓ Привод ↓ Преобразователь энергии ↓ Рабочий процесс ↓ Модуль восстановления	Силовая установка ↓ Привод ↓ Технологический модуль ↓ Рабочий орган	Силовая установка ↓ Привод ↓ Рабочий орган	Силовая установка ↓ Рабочие органы

Изложенная в табл. 1 информация пояснений не требует и наглядно отражает звенья трансформационной системы с происходящими в них потерями энергии. Одним из путей повышения эффективности привода помольных агрегатов может служить виброинерционный механизм передачи движения рабочим органом. Он сочетают в себе различные функции (виброактивность, управляемость передачи силового импульса, максимум количества воздействий и минимум перемещений, возможность приближения рабочего процесса к методу измельчения единичного зерна и др.). Из новых аппаратов данного направления можно выделить рессорно-стержневые и штифтовые мельницы, конструкции которых приведены в [6, 13].

Основная проблема совершенствования дезинтеграторных технологий заключается в несовершенстве единичных актов разрушения, приводящих к огромным потерям на трение. Наиболее эффективным решением этой проблемы является создание агрегатов, осуществляющих воздействие на материал по методу индивидуального зерна. Именно на этом подходе основана конструкция стержневых виброударных мельниц.

В качестве варианта кардинального повышения эффективности струйной мельницы, которая, согласно табл. 1, имеет максимум трансформаций энергии, можно привести ветроагрегат для струйного измельчения (рис. 3). В нём энергия ветра заменяет несколько стадий её преобразования [14].

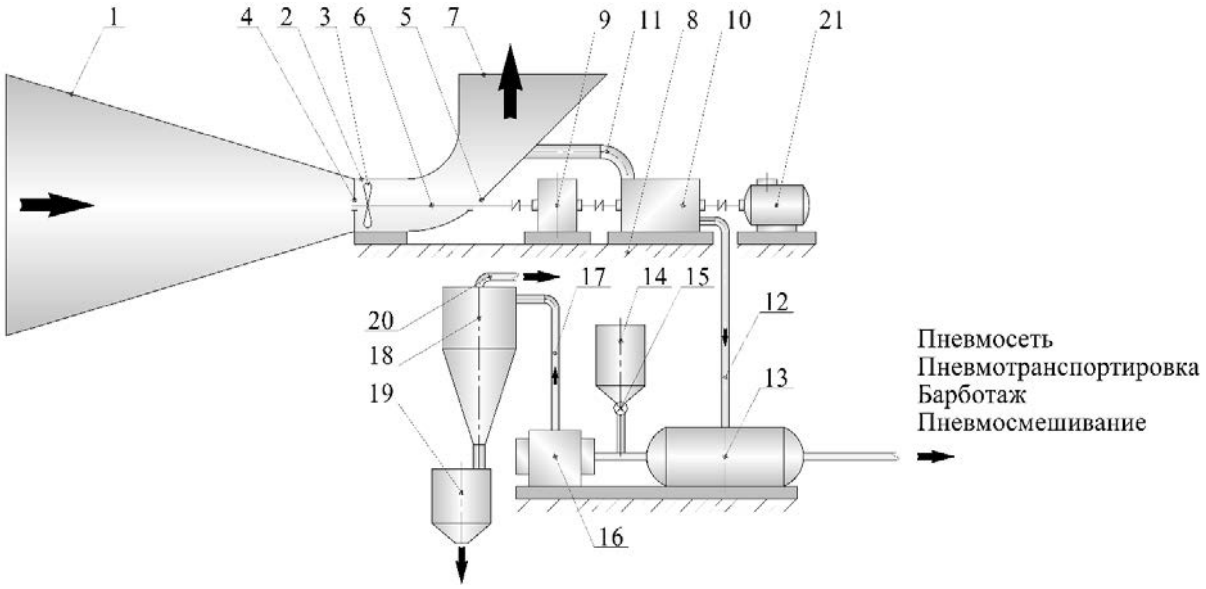


Рис. 3. Ветроагрегат для струйного измельчения

Ветроагрегат для струйного измельчения содержит конфузор 1 для концентрации воздушного потока, в горловине которого в цилиндрическом корпусе 2 установлено турбинное колесо 3. Ротор 6 турбинного колеса закреплён на опорах 4 и 5, а для выпуска отработанного воздуха предусмотрен патрубок 7. Вся ветроэнергетическая часть смонтирована на несущей конструкции 8, на которой установлены мультипликатор 9 и компрессор 10, кинематически соединённые с ротором 6 турбинного колеса 3. Забор воздуха в компрессор 10 и его подача под давлением в систему измельчения осуществляются соответственно через патрубок 11, соединённый с патрубком 7 для выпуска отработанного после турбинного колеса 3, и через напорный трубопровод 12.

Технологическая цепь струйного измельчителя включает в себя ресивер 13, бункер 14 с исходным материалом, подлежащим измельчению, питатель 15, струйную мельницу 16, отводящий трубопровод 17, осадительную камеру 18 и выходную трубу 20 для удаления отработанного газового агента.

Включение в состав ветроагрегата обратимой электрической машины 21 выводит её на новый функциональный уровень, т. к. система может работать в режиме прямого использования энергии, её накопления или отдачи уже накопленной на другие технологические цели.

К тепловым процессам, заслуживающим особого внимания и осуществляемым при проведении технологических переделов, относятся сушка, обжиг, нагрев материала, автоклавная обработка, пропаривание, плавление и ряд других. Это наиболее энергоемкие процессы во всей технологической структуре промышленности. Потенциал энергосбережения в них огромен, но его реализация требует серьезного анализа, значительных капитальных затрат и сопряжена с организационными трудностями.

В таком случае вибрационная техника может сыграть особую роль. Принципиально новой предполагается конструкция агрегата для обжига и сушки, и при соответствующих доработках она может заменить вращающиеся печи и сушилки различных конструкций. Схема такого агрегата изображена на рис. 4. Установка состоит из вертикально установленной на пружинных элементах рабочей камеры, выполненной в виде винтовой спирали прямоугольного сечения с патрубками для подачи сырьевого материала, отбора обожженного или высушенного продукта, подачи теплового газового агента и отвода отработанных газов. Для привода используется вибрационный механизм, установленный на верхней части рабочей камеры. Работа агрегата организована по противопоточной схеме и легко управляется.

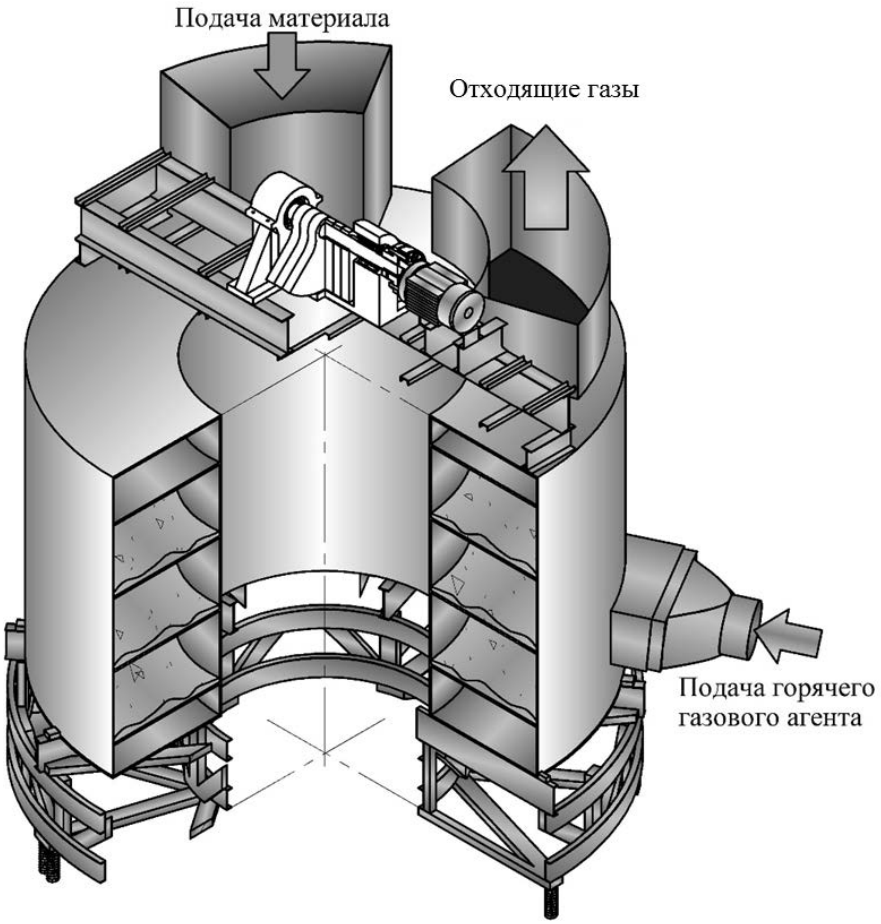


Рис. 4. Схема спирального агрегата для обжига и сушки

Предложенная конструкция требует очень серьезных работ по её реализации: выбору принципиально новых теплоизоляционных и конструкционных материалов, созданию приводного механизма для придания колебаний большим массам, обеспечению доступа для обслуживания рабочих зон и т. д. И это, тем не менее, побуждает ставить задачу создания такого или близкого по цели агрегата, который будет востребован на мировом рынке.

Вибрационные колебания и ударные волны вызывают в обрабатываемой среде значительные изменения, которые характеризуются рядом технологиче-

ских эффектов. К ним можно отнести и исследуемые авторами эффект адсорбционного повышения прочности, эффект ударного выбивания влаги из капиллярно-пористых тел и ее сдува воздушным потоком и эффект пенной сушки [15]. Так, по первому из них при добавлении в бетонные смеси 0,2…0,3 % к массе цемента твердого природного адсорбента и последующего виброуплотнения прочность образцов может повышаться в 1,2…1,5 раза. Подобные технологии, а их немало наработано специалистами различных отраслей, требуется как можно оперативнее внедрять в производство.

Подобный перечень разработок можно многократно продолжать. Важно понимать, что арсенал отечественной науки охватывает почти весь спектр современных технологий. Например, вибрационные принципы используются в процессах измельчения, смешивания, уплотнения, гранулирования, упрочнения, горения, сварки, плавления, обогащения, штамповки, обработки металлов резанием, нанесения покрытий и т. д. Это в итоге приводит только к одному выводу – вибрационные машины и технологии являются по настоящему общетехническим инструментом и могут служить реальной основой для повышения эффективности работы базовых отраслей народного хозяйства.

Концепция формирования отрасли технологического машиностроения

Обоснованием необходимости ускоренного становления технологического машиностроения можно считать прогноз глобального мирового развития многих авторов, например, Ф. А. Шамрая [16]. Графическая интерпретация приводимой им модели иллюстрируется на рис. 5, где изображена схема цикличности экономики.

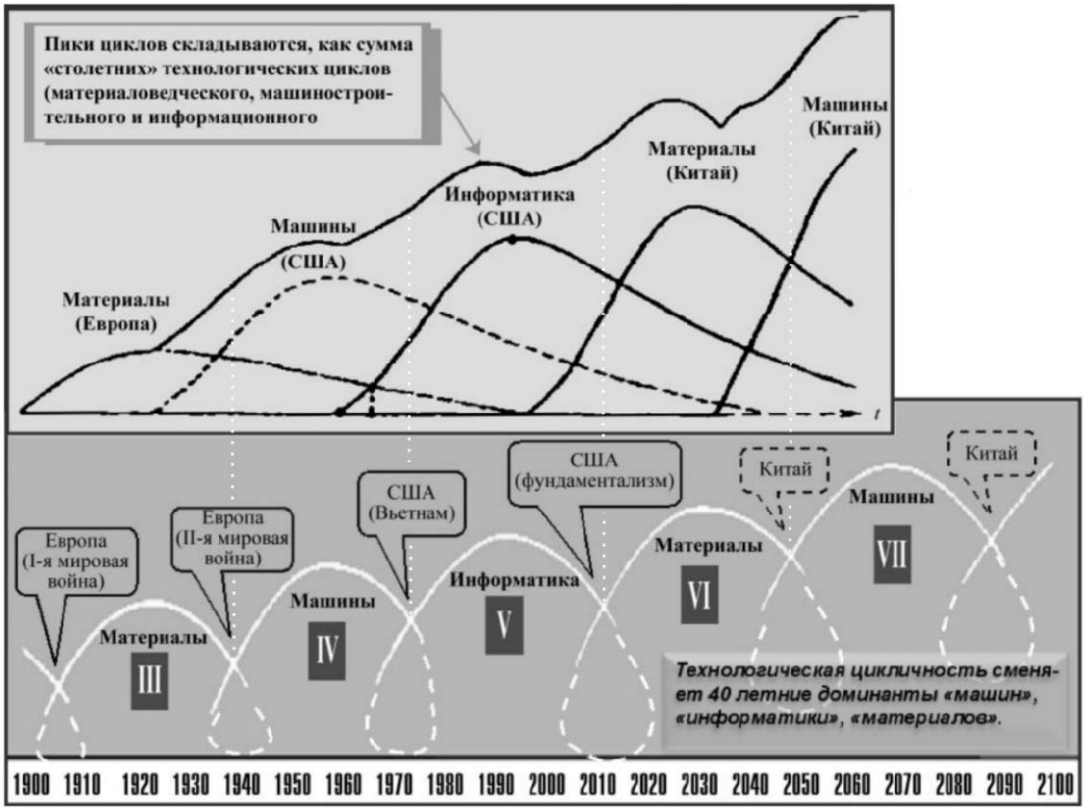


Рис. 5. Циклограммы технологического развития мировой экономики [16]

Неоспоримым выводом из представленных циклограмм как 40-летних, так и 100-летних технологических циклов является то, что в 2010…2050 гг. в экономике будут доминировать материалы, в 2040…2100 гг. – машины, а неоспоримым лидером будет Китай.

Складывающаяся тенденция свидетельствует о том, что технологическое машиностроение, в том числе как основа создания «умных» машин и комплексов, является важнейшим трендом развития мировой экономики на ближайшие десятилетия. На этом основании следует дать комплексную оценку потенциала модернизации технологической структуры, создать банк потенциально эффективных машин, технологий и комплексов, сформировать национальную стратегию инноваций и разработать план её реализации, а самое главное – без промедления приступить к практическим действиям.

В статье авторы ставят своей целью выделить особую роль вибрационных принципов в оборудовании и управляемых технологиях как одну из фундаментальных основ инновационного развития базовых отраслей промышленности. Прорыв в этой области связан с формированием новой отрасли – технологического машиностроения.

Выполненный межотраслевой анализ [8] работы технологических комплексов показывает, что неучтённый и реально осуществимый потенциал энергосбережения здесь составляет не менее 15…20 % всей электроэнергии и 5…8 % других видов энергоресурсов. Совокупная примерная оценка доли технологического машиностроения в ВВП с учётом внутреннего рынка, экспорта и резервов энерго- и ресурсосбережения, а также рационального природопользования имеет тенденции к росту до 15…20%.

В идеале требуется сформировать новое мышление в сфере инновационной модернизации промышленности. В данном случае видятся два основных сценария развития. Первый – традиционный, основанный на принципах поэлементной модернизации, он широко распространён и особого эффекта не даёт, второй – интенсивный, с директивным решением проблем и созданием принципиально новых объектов техники.

Отдельно следует остановиться на рынке продукции проектирования технологических комплексов и заводов. Это ниша чисто интеллектуального продукта подобна разработке программ для ЭВМ, систем проектирования и АСУ; она начинает формироваться только сейчас и обещает большие экономические и социальные выгоды его создателям. При этом результирующее правило конкурентной борьбы в инновационной сфере – преимущество наступающих.

Создание отрасли технологического машиностроения позволит оперативно решать задачи опережающего развития, устранять экологические угрозы, формировать новые прогрессивные производственные кластеры, но самое главное – обеспечить высокий жизненный уровень населения.

Заключение

Реальные возможности для инновационной модернизации России и Беларуси предоставляет история, и они есть у наших государств. Настало время это делать в промышленных масштабах и переходить от сырьевой экономики к высокоинтеллектуальной, обеспечивающей выход на передовые позиции в мире. Технологический прорыв в настоящее время возможен только благодаря выбору нужного направления развития и сосредоточения на нем необходимых ресурсов. По глубокому убеждению авторов, прежде всего вибрационные машины и технологии являются той исходной основой, которая позволит в кратчайшие сроки создавать новые вы-

сокоэффективные виды оборудования.

Главные резервом снижения издержек общественного производства является совершенствование технологий комплексной переработки сырья и материалов и получение продуктов, необходимых для удовлетворения потребностей человека. Это наиболее крупные и затратные предприятия из всех существующих. Реализация этого потенциала без перевода таких производств на новый уровень развития невозможен, а прорыв связан с формированием новой отрасли – технологического машиностроения. Глобальный прогноз мировой экономики делает такой путь развития неизбежным. Национальный интерес Беларуси во многом может быть основан на этом прогнозе.

Представленная информация является частным случаем в рассмотрении фундаментальной проблемы и не претендует на полноту освещения. Необходима большая работа, большие проекты и инвестиции для реализации поставленных задач по формированию отрасли технологического машиностроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сиваченко, Л. А.** Современное технологическое машиностроение: основные положения / Л. А. Сиваченко // Инженер-механик. – 2010. – № 4. – С. 10–20.

2. **Сиваченко, Л. А.** Современное технологическое машиностроение: резервы развития / Л. А. Сиваченко // Инженер-механик. – 2011. – № 1. – С. 11–21.

3. **Ревнивцев, В. И.** Селективное разрушение минералов / В. И. Ревнивцев [и др.]. – М. : Недра, 1988. – 286 с.

4. **Сиваченко, Л. А.** Технологическое машиностроение – стратегический резерв развития промышленности Беларуси / Л. А. Сиваченко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2011. – № 3. – С. 126–130.

5. **Сиваченко, Л. А.** Энерготехнологическая концепция национальной безопасности / Л. А. Сиваченко, Б. А. Унаспеков // Энергоэффективность. – 2013. – № 5. – С. 28–31.

6. **Сиваченко, Л. А.** Технологические аппараты адаптивного действия / Л. А. Сиваченко. – Минск : БГУ. 2008. – 375 с.

7. **Сиваченко, Л. А.** Основные положения совершенствования дезинтеграторных технологий / Л. А. Сиваченко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2011. – № 4. – С. 95–106.

8. Технологические переделы с максимальным потенциалом энергосбережения / Л. А. Сиваченко, У. К. Кусебаев, И. А. Реутский, А. М. Ровский // Энергоэффективность. – 2015. – № 10. – С. 24–30.

9. **Сиваченко, Л. А.** Технологическая вибротехника – основа технического перевооружения базовых отраслей промышленности / Л. А. Сиваченко, С. Ф. Яцун, В. С. Севостьянов // Управляемые вибрационные технологии и машины : сб. науч. ст. – Курск, 2010. – Т. 1. – С. 34–39.

10. **Сиваченко, Л. А.** Практическая реализация технологической вибротехники / Л. А. Сиваченко // Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины. : сб. науч. ст. – Курск, 2014. – Т. 1. – С. 100–113.

11. **Сиваченко, Л. А.** Вибрационные машины и технологии – основа создания отечественного технологического машиностроения / Л. А. Сиваченко // Управляемые выбрационные технологии и машины : сб. науч. ст. – Курск, 2012. – Т. 1. – С. 30–39.

12. Энерготехнологические проблемы дезинтеграторных технологий в промышленности строительных материалов и пути их решения / Л. А. Сиваченко, Т. Л. Сиваченко, Н. В. Курочкин, Ю. К. Добровольский // Энергоэффективность. – 2014. – № 12. – С. 22–25.

13. **Сиваченко, Л. А.** Технологические резервы национальной экономики / Л. А. Сиваченко, С. Ж. Багитова, Ш. Г. Джумадилова // Инженерное образование и наука в XXI веке. Проблемы и перспективы : тр. Междунар. форума. – Алматы, 2014. – Т. 2. – С. 597–604.

14. **Сиваченко, Л. А.** Использование энергии ветра в технологиях производства строительных материалов / Л. А. Сиваченко, Ю. К. Добровольский // Энергоэффективность. – 2014. – № 8. – С. 29–31.

15. **Севостьянов, В. С.** Основные положения физико-химической механики в совершенствовании технологических процессов / В. С. Севостьянов, Л. А. Сиваченко, Т. Н. Ильина // Экология и рациональное природопользование как фактор устойчивого развития : сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф., Белгород, 2014. – С. 263–270.

16. **Шамрай, Ф. А.** Модернизация в России / Ф. А. Шамрай // Строительные и дорожные машины. – 2012. – № 2. – С. 2–7.

17. Технологические аппараты адаптивного действия / Л. А. Сиваченко [и др.]. – Минск : БГУ, 2008. – 375 с.

Статья сдана в редакцию 24 мая 2016 года

Леонид Александрович Сиваченко, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. E-mail: 228011@mail.ru.
Татьяна Леонидовна Сиваченко, соискатель, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. E-mail: tatsianamail.86@gmail.com.

Leonid Aleksandrovich Sivachenko, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. E-mail: 228011@mail.ru.
Tatiana Leonidovna Sivachenko, external PhD student, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. E-mail: tatsianamail.86@gmail.com.

УДК 621.787

С. А. Сухоцкий

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗАГОТОВОК, УПРОЧНЕННЫХ МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКИМ НАКАТЫВАНИЕМ

UDC 621.787

S. A. Sukhotsky

STUDY OF MICRORELIEF OF FLAT WORKPIECE SURFACES HARDENED BY MAGNETO-DYNAMIC ROLL FORMING

Аннотация

В статье приведены зависимости шероховатости упрочненных плоских поверхностей стальных заготовок от параметров процесса магнитно-динамического накатывания. Определены оптимальные режимы процесса упрочнения. Исследованы характеристики получаемого на поверхности заготовок микрорельефа, представляющего собой сетку пересекающихся микролунок. Установлено повышение удельной маслоемкости плоских поверхностей, упрочненных магнитно-динамическим накатыванием.

Ключевые слова:

шероховатость, микрорельеф, сетка микролунок, удельная маслоемкость, магнитная система, деформирующие шары, поверхностное пластическое деформирование.

Abstract

The paper shows the dependencies of roughness of hardened flat surfaces of steel workpieces upon the parameters of the magneto-dynamic roll forming process. Optimum modes of the process of hardening have been determined. The characteristics of the micro-relief, which is a mesh of mating micro-irregularities obtained on workpiece surfaces, have been studied. The increase of specific oil absorption power of flat surfaces hardened by magneto-dynamic roll forming has been discovered.

Key words:

roughness, microrelief, mesh of micro-irregularities, specific oil absorption power, magnetic system, deforming balls, surface plastic deformation.

Введение

Существенную роль на эксплуатационные свойства поверхностей деталей машин оказывают их качественные характеристики, в том числе микрорельеф поверхности. Для обеспечения высоких качественных характеристик поверхностей в технологических процессах изготовления деталей применяют методы поверхностного пластического деформирования.

К перспективным методам отделочно-упрочняющей обработки относится магнитно-динамическое накатывание плоских поверхностей, при котором упрочнение осуществляют деформирующими шарами, свободно установленными в кольцевой камере инструмента и введенными в контакт с поверхностью заготовки, перемещаемой с подачей. При этом деформирующим шарам сообщают энергию, необходимую для импульсно-ударного деформирования поверхности, от приводных шаров посредством воздействия на по-

© Сухоцкий С. А., 2016

следние вращающимся магнитным полем инструмента. Магнитно-динамическое накатывание обеспечивает совмещение процессов упрочнения и формирования на плоской поверхности детали микрорельефа с высокой маслоемкостью [1].

В связи с этим актуальной задачей является проведение исследований по выявлению технологических возможностей способа магнитно-динамического накатывания плоских поверхностей деталей.

Исследование влияния режимов процесса магнитно-динамического накатывания плоских заготовок на шероховатость упрочненной поверхности

В соответствии с поставленной задачей были выявлены зависимости шероховатости плоских поверхностей заготовок от параметров процесса магнитно-динамического накатывания.

Отделочно-упрочняющую обработку заготовок из стали 45 различной твердости осуществляли по разработанному способу [1] на вертикально-фрезерном станке на следующих режимах: n = 500…1300 мин$^{-1}$ (V = 200…518 м/мин); S = 20…500 мм/мин; h = 0,7 мм; количество рабочих ходов инструмента – 1.

Магнитно-динамическое накатывание поверхности заготовок производили инструментом, содержащим корпус, кольцевые камеры, приводные и деформирующие шары, магнитную систему [2]. В состав магнитной системы входили кольцевой постоянный магнит осевой намагниченности из феррита стронция с размерами (D × d × h) 71 × 27 × 14 мм и магнитопроводные зубчатые диски из стали Ст 3 с прямобочным профилем зубьев. Величина магнитной индукции на периферии зубьев магнитопроводных дисков – 0,23 Тл. В кольцевых камерах инструмента были установлены приводные и деформирующие шары из стали ШХ15 (62…65 HRC) диаметром 22 и 12 мм соответственно. Степень точности шаров – 100 (ГОСТ 3722-81). Количество приводных и деформирующих шаров – 16 и 24 шт. соответственно.

Шероховатость упрочненных плоских поверхностей заготовок измеряли профилометром-профилографом фирмы «Митутойо» (Mitutoyo) модели Surftest SJ-210 (Япония). Погрешность измерения шероховатости при этом составляла не более 5 %. За величину шероховатости упрочненной поверхности заготовки принимали среднее значение пяти измерений шероховатости по параметру *Ra*.

Результаты исследований шероховатости упрочненной поверхности заготовок представлены на рис. 1 и 2.

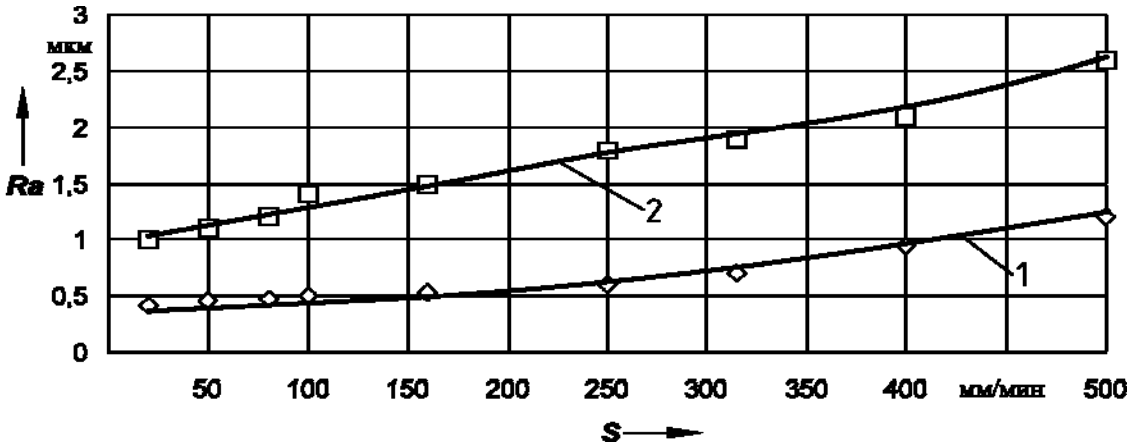


Рис. 1. Зависимость шероховатости упрочненной поверхности заготовок от подачи инструмента: 1 – сталь 45 (200…220 HB), $Ra_{исх}$ = 4,5…4,3 мкм; 2 – сталь 45 (41…44 HRC), $Ra_{исх}$ = 4,3…4,1 мкм

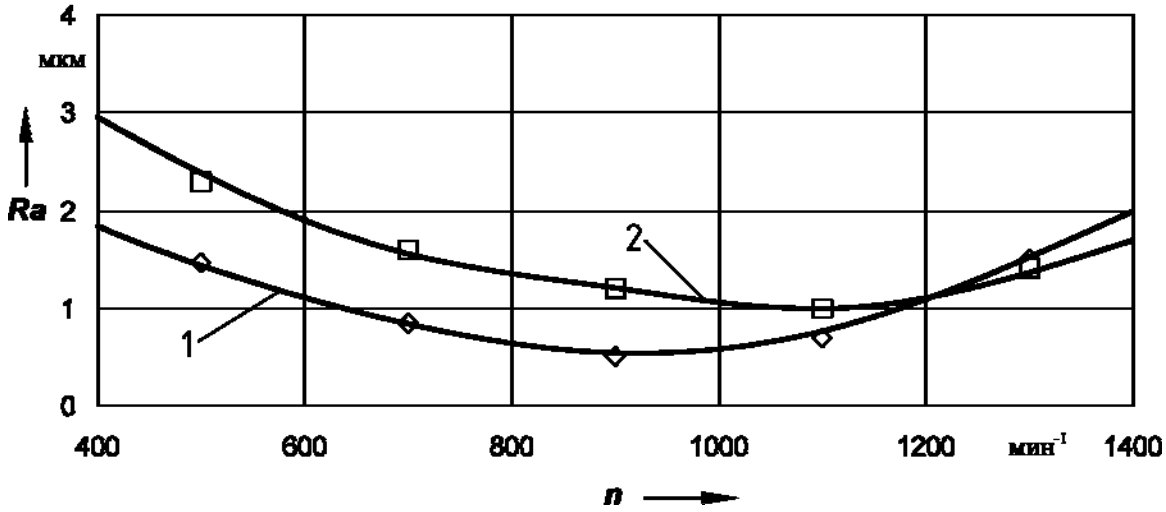


Рис. 2. Зависимость шероховатости упрочненной поверхности заготовок от частоты вращения инструмента: 1 – сталь 45 (200…220 HB), $Ra_{исх}$ = 4,5…4,3 мкм; 2 – сталь 45 (41…44 HRC), $Ra_{исх}$ = 4,3…4,1 мкм

Анализ экспериментальных зависимостей (см. рис. 1 и 2) показывает, что магнитно-динамическое накатывание в диапазоне подач от 20 до 500 мм/мин обеспечивает снижение шероховатости поверхности заготовок из стали 45 твердостью 200…220 HB и 41…44 HRC с *Ra* 4,5…4,1 мкм до 1,25…0,45 и 2,7…1,1 мкм соответственно. Снижение шероховатости поверхности заготовок имеет место при частоте вращения инструмента 400…1300 мин$^{-1}$ (V = 160…518 м/мин). При частоте вращения инструмента меньше 400 мин$^{-1}$ приводные шары не могут оторваться от магнитной системы инструмента, что исключает их взаимодействие с деформирующими шарами и делает невозможным процесс упрочнения.

На рис. 3…5 показаны зависимости шероховатости упрочненных поверхностей заготовок от числа рабочих ходов инструмента, исходной шероховатости заготовок и натяга между приводными и деформирующими шарами.

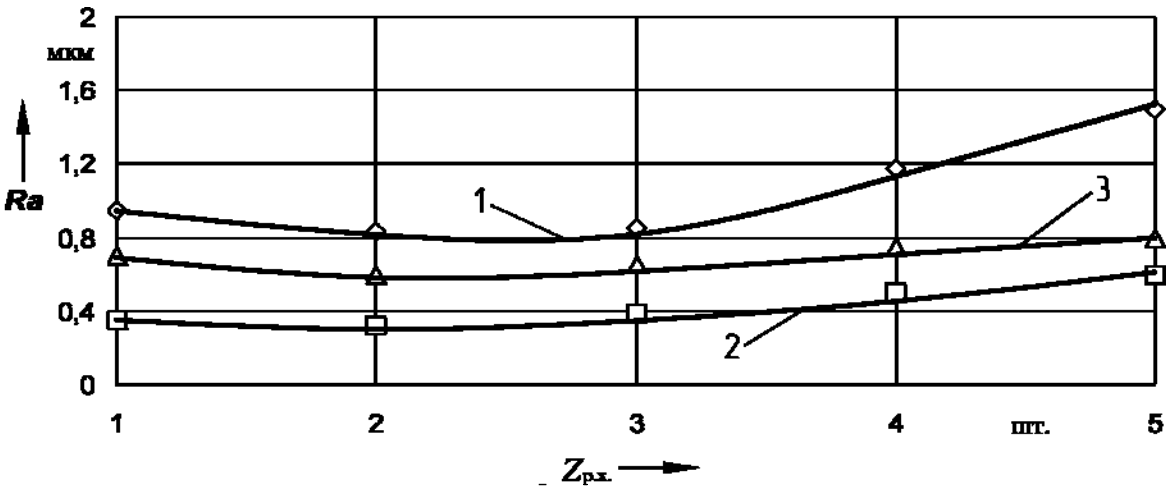


Рис. 3. Зависимость шероховатости упрочненной поверхности от числа рабочих ходов инструмента: 1 – сталь 45 (200…220 HB), $Ra_{исх}$ = 6,3…6,0 мкм; 2 – сталь 45 (200…220 HB), $Ra_{исх}$ = 1,25…1,15 мкм; 3 – сталь 45 (41…44 HRC), $Ra_{исх}$ = 2,5…2,3 мкм

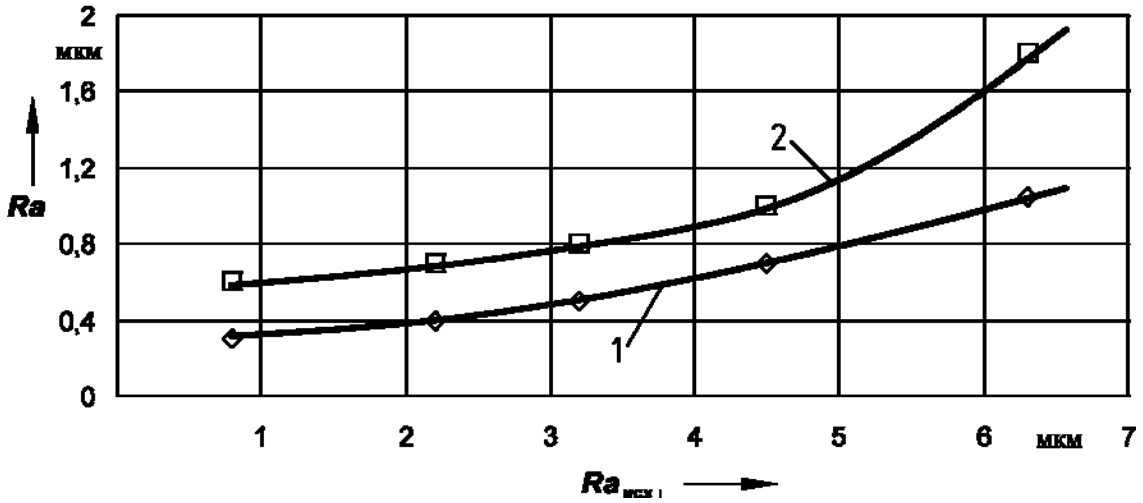


Рис. 4. Зависимость шероховатости обработанной поверхности от исходной шероховатости поверхности заготовок: 1 – сталь 45 (200…220 HB); 2 – сталь 45 (41…44 HRC)

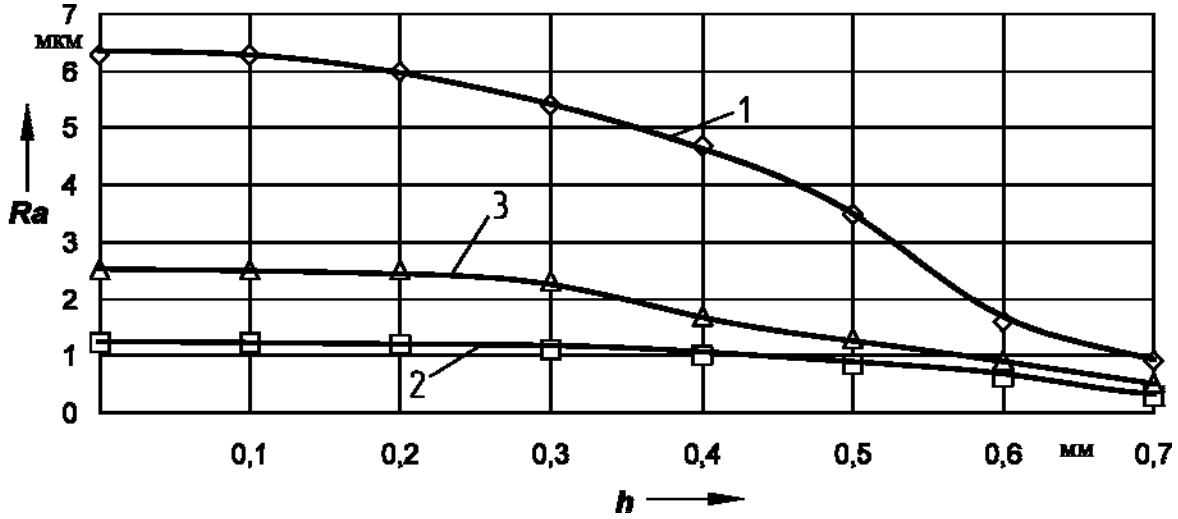


Рис. 5. Зависимость шероховатости упрочненной поверхности от натяга между деформирующими и приводными шарами инструмента: 1 – сталь 45 (200…220 HB) $Ra_{исх}$ = 6,3…6,0 мкм; 2 – сталь 45 (200…220 HB) $Ra_{исх}$ = 1,25…1,15 мкм; 3 – сталь 45 (41…44 HRC) $Ra_{исх}$ = 2,5…2,3 мкм

Установлено, что при магнитно-динамическом накатывании плоских поверхностей заготовок из стали наибольшее снижение шероховатости происходит за первый и второй рабочие ходы инструмента. Третий и последующий рабочие ходы инструмента не приводят к дальнейшему уменьшению шероховатости.

Анализ полученных зависимостей (см. рис. 4) показывает, что магнитно-динамическое накатывание позволяет снизить шероховатость (по параметру *Ra*) плоских поверхностей заготовок из стали 45 твердостью 200…220 HB в 5,5…6 раз, а твердостью 41…44 HRC – в 4…4,5 раза. При величине натяга между деформирующим и приводными шарами применяемого инструмента до 0,3 мм (см. рис. 5) исходная шероховатость плоской поверхности почти не изменяется, т. к. энергии взаимодействия между деформирующими и приводными шарами недостаточно для смя-

тия микронеровностей заготовки. При натяге между деформирующими и приводными шарами инструмента в диапазоне 0,3…0,7 мм имеет место эффективное снижение исходной шероховатости поверхности заготовок.

Выполнена оптимизация параметров процесса магнитно-динамического накатывания плоских поверхностей заготовок из стали 45 (200…220 HB) с $Ra_{исх}$ = 4,5…4,3 мкм с целью максимального снижения их шероховатости.

Установлено, что основными факторами процесса упрочнения, оказывающими наибольшее влияние на шероховатость упрочненной поверхности, являются частота вращения n (скорость V), подача S и диаметр деформирующих шаров d инструмента. Зависимость шероховатости упрочненной поверхности заготовок $Ra = f(n, S, d)$ от основных факторов аппроксимировали полиномом второй степени и использовали центральный композиционный план, отвечающий требованию ротатабельности.

В результате статистической обработки экспериментальных данных получена зависимость шероховатости упрочненной плоской поверхности от основных параметров обработки:

$$Ra = 7,432 - 1,384 \cdot 10^{-2} \cdot n - 5,986 \cdot 10^{-4} \times \\ \times S - 6,748 \cdot 10^{-2} \cdot d - 0,31 \cdot 10^{-6} \cdot n \cdot S + \\ + 6,3 \cdot 10^{-6} \cdot n \cdot d - 37,7 \cdot 10^{-6} \cdot d \cdot S + \\ + 7,325 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + 6,29 \cdot 10^{-6} \cdot S^2 + \\ + 2,08 \cdot 10^{-3} \cdot d^2. \quad (1)$$

Полученная модель (1) имеет погрешность в пределах 8…12 %, что позволяет считать ее в достаточной степени адекватной.

Графическое изображение математической модели, показывающее зависимость шероховатости Ra обработанных плоских поверхностей заготовок от двух соответствующих факторов, представлено на рис. 6.

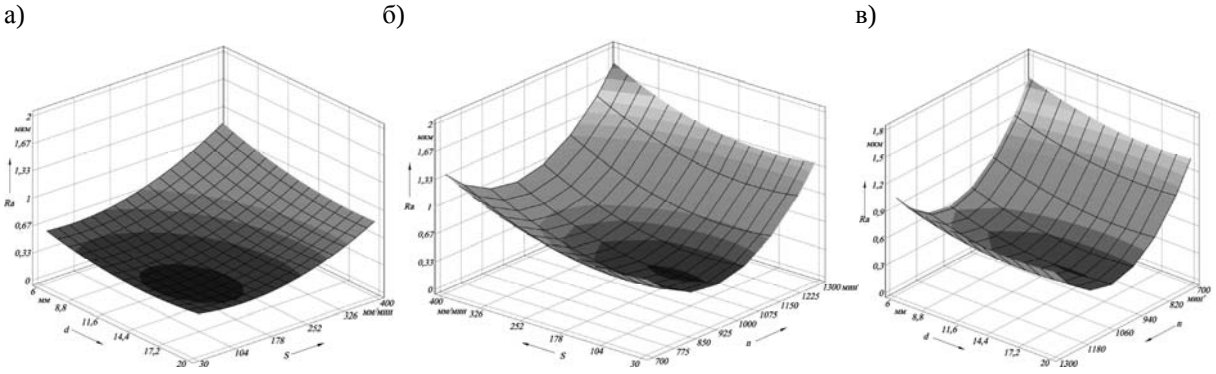


Рис. 6. Влияние подачи S и диаметра деформирующего шара d (а), подачи S и частоты вращения инструмента n (б), частоты вращения инструмента n и диаметра деформирующего шара d (в) на шероховатость плоской поверхности, упрочненной магнитно-динамическим накатыванием

Полученные диаграммы позволяют определить значения режимов магнитно-динамического накатывания плоских поверхностей и диаметр деформирующего шара инструмента, при которых обеспечивается заданная чертежом шероховатость поверхности заготовки по параметру Ra.

Анализ полученных результатов показывает, что оптимальными режимами магнитно-динамического накатывания плоских поверхностей заготовок из стали 45 (200…220 HB) являются частота вращения инструмента n = 940 мин$^{-1}$ (V = 375 м/мин), подача инструмента S = 120 мм/мин, при которых достига-

ется снижение исходной шероховатости поверхности с *Ra* 4,3…4,1 до *Ra* 0,41…0,36 мкм. Из графиков видно, что наибольшее снижение шероховатости упрочненной поверхности имеет место при диаметре деформирующих шаров инструмента, равном 15 мм.

Исследование характеристик сетки микролунок на упрочненной поверхности заготовок

Экспериментально установлено, что магнитно-динамическое накатывание совместно с интенсивным снижением шероховатости обеспечивает формирование на плоской поверхности заготовки сетки пересекающихся микролунок, выполняющих в парах трения функцию удержания смазки и оказывающих существенную роль на износостойкость, прирабатываемость, сопротивление схватыванию и гидроплотность поверхностей [3]. В связи с этим определение и обеспечение рациональных параметров микрорельефа поверхности заготовки, а также управление его характеристиками являются важной технологической задачей.

Научный и практический интерес представляют исследования, связанные с определением влияния режимов процесса магнитно-динамического накатывания на параметры микрорельефа (сетки пересекающихся микролунок) упрочняемой поверхности.

Шаг *P* и глубину $h_л$ микролунок на поверхности упрочненных заготовок измеряли методом профилографирования с использованием профилометра-профилографа Surftest SJ-210. За экспериментальные значения параметров *P* и $h_л$ принимали их средние величины на участке поверхности длиной 6,4 мм (рис. 7). Упрочняемые образцы из стали 45 (41…44 HRC) имели исходную шероховатость *Ra* = 1,2…1,3 мкм. После упрочнения образцов магнитно-динамическим накатыванием (n = 800 мин$^{-1}$ (V = 320 м/мин), S = 125 мм/мин, h = 0,7 мм) шероховатость поверхности снизилась и составила *Ra* 0,28…0,25 мкм.

Результаты экспериментальных исследований шага и глубины микролунок упрочненных поверхностей заготовок представлены на рис. 8 и 9 соответственно.

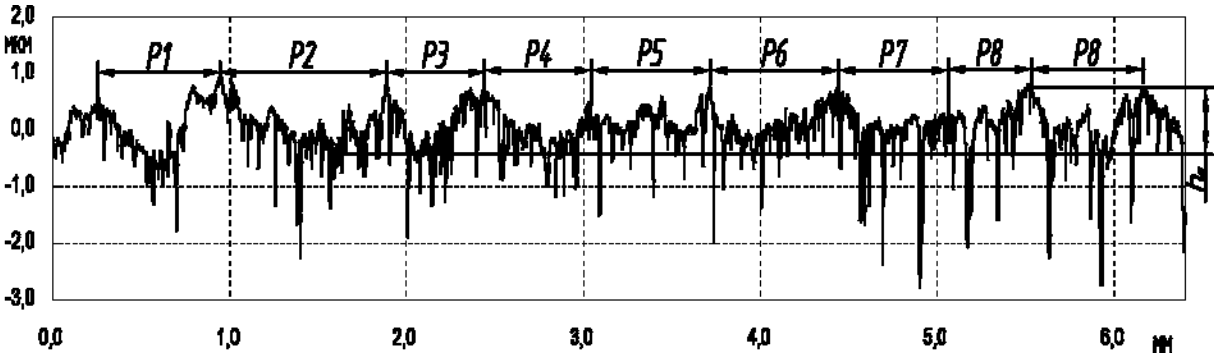


Рис. 7. Профилограмма поверхности плоской детали из стали 45 (41…44 HRC), упрочненной магнитно-динамическим накатыванием

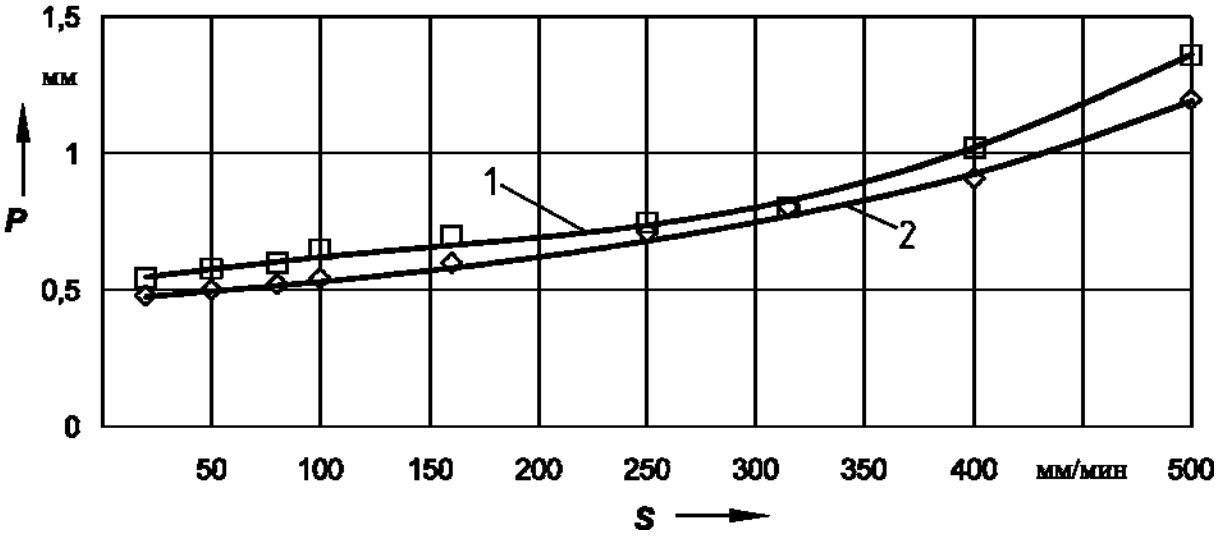


Рис. 8. Зависимость шага микролунок, имеющихся на поверхности упрочненных заготовок, от подачи инструмента: 1 – сталь 45 (200…220 HB); 2 – сталь 45 (41…44 HRC)

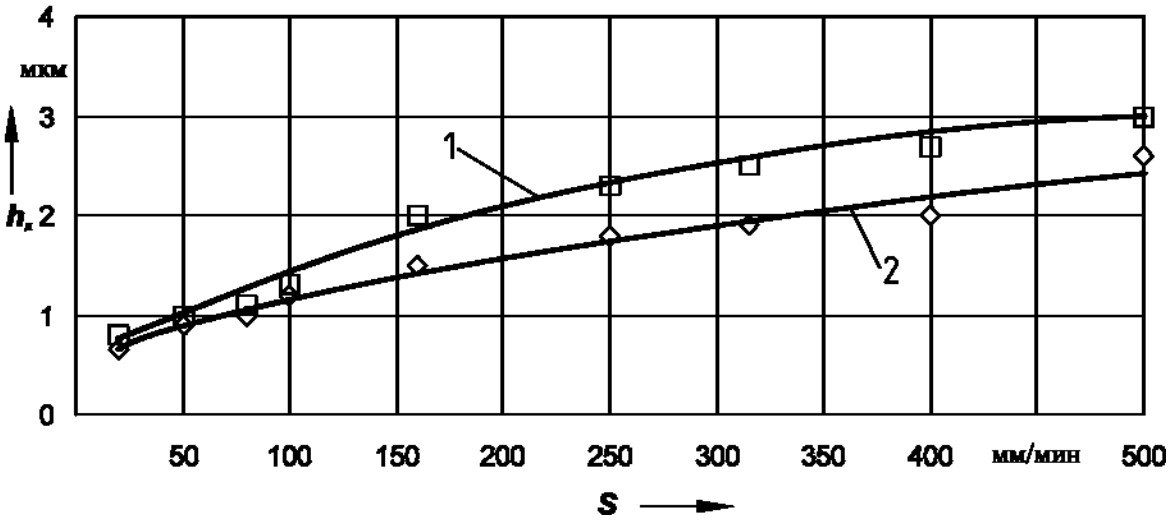


Рис. 9. Зависимость глубины микролунок на поверхности упрочненных заготовок от подачи инструмента: 1 – сталь 45 (200…220 HB); 2 – сталь 45 (41…44 HRC)

Анализ экспериментальных зависимостей показывает, что шаг P и глубина микролунок $h_л$ возрастают с увеличением подачи инструмента, что связано с уменьшением числа ударов деформирующих шаров в единицу времени на элементарный участок упрочняемой поверхности. При этом глубина микролунок больше у заготовок из стали 45 твердостью 200…220 HB (чем у заготовок с аналогичной стали твердостью 41…44 HRC), т. к. они характеризуются более высокой пластичностью.

Определение удельной маслоемкости

Важной характеристикой, определяющей эксплуатационные свойства упрочненных поверхностей заготовок, является их удельная маслоемкость [4].

Расчет указанного параметра осуществляли на основе полученных профилограмм упрочненных поверхностей за-

готовок и построения соответствующих им кривых Аббота-Файерстоуна [5, 6].

Используя параметры формы профиля шероховатости анализируемой поверхности заготовки R_{vk} и Mr_2, удельную маслоемкость поверхностей Q, мм^3/см^2, неупрочненных и упрочненных магнитно-динамическим накатыванием, рассчитывали по формуле [4]

$$Q = \frac{R_{vk}}{20}\left(1 - \frac{Mr_2}{100\ \%}\right). \qquad (2)$$

Кривые Аббота-Файерстоуна, соответствующие профилограммам обработанных поверхностей заготовок, показаны на рис. 10.

В табл. 1 представлены результаты расчета удельной маслоемкости плоских поверхностей заготовок из стали 45.

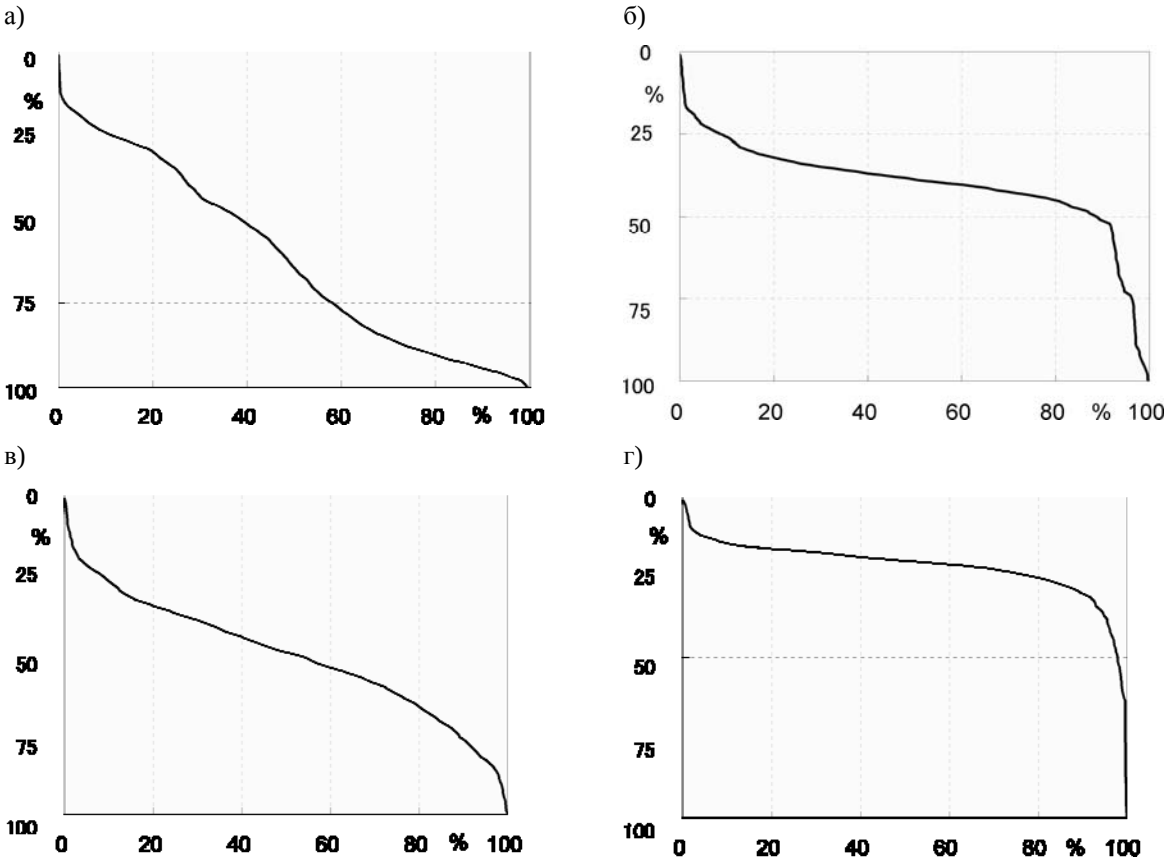


Рис. 10. Кривые Аббота-Файерстоуна, соответствующие профилограммам обработанных плоских поверхностей заготовок: а – поверхность заготовки из стали 45 (200…220 HB), полученная методом фрезерования (*Ra* 6,2…5,9 мкм); б – поверхность заготовки из стали 45 (200…220 HB), полученная фрезерованием и последующим упрочнением магнитно-динамическим накатыванием (*Ra* 0,44…0,41 мкм); в – поверхность заготовки из стали 45 (41…44 HRC), обработанная методом шлифования (*Ra* 0,63…0,61 мкм); г – поверхность заготовки из стали 45 (41…44 HRC), полученная шлифованием и последующим магнитно-динамическим накатыванием

Табл. 1. Удельная маслоемкость плоских поверхностей анализируемых заготовок

Метод обработки поверхности	Твердость образцов	*Ra*, мкм	R_{vk}, мкм	Mr_2, %	Q, мм^3/(см^2·10^{-3})
Фрезерование	200–220 HB	6,2–5,9	0,732	97,88	0,778
Фрезерование + МДН		0,44–0,41	0,743	86,40	5,052
Шлифование	41–44 HRC	0,63–0,61	0,764	88,67	4,328
Шлифование + МДН		0,18–0,16	0,614	82,40	5,403

Сравнительный анализ данных, представленных в табл. 1, показывает, что магнитно-динамическое накатывание поверхностей заготовок из стали 45 (200…220 HB), полученных методом фрезерования, обеспечивает повышение удельной маслоемкости поверхности в 6,5, а из стали 45 (41…44 HRC), полученных методом шлифования, – в 1,25 раза.

Заключение

Разработанный способ магнитно-динамического накатывания плоских поверхностей обеспечивает следующие качественные характеристики:

– снижение шероховатости поверхности заготовок из стали 45 твердостью 200…220 HB в 5,5…6, а твердостью 41…44 HRC – в 4…4,5 раза;

– получение на поверхности плоских стальных заготовок сетки микролунок с шагом P = 0,5…1,4 мм и глубиной $h_л$ = 0,7…3,0 мкм;

– повышение удельной маслоемкости поверхностей заготовок из стали 45 в 1,25…6,5 раза.

Оптимальными параметрами процесса магнитно-динамического накатывания плоских поверхностей заготовок из стали 45 (200…220 HB) (для достижения шероховатости поверхности Ra 0,41…0,36 мкм) являются частота вращения инструмента n = 940 мин$^{-1}$ (V = 375 м/мин), подача S = 120 мм/мин, диаметр деформирующих шаров инструмента d = 15 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструмент и способ магнитно-динамического упрочнения плоской поверхности детали : пат. 17545 РБ, МПК B 24 B 39/02 / А. М. Довгалев, С. А. Сухоцкий; заявитель Белорус.-Рос. ун-т. – № a 20111278 ; заявл. 03.10.11 ; опубл. 30.10.13 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 3. – 4 с.

2. Математическое моделирование магнитно-динамического инструмента для упрочняющей обработки плоских поверхностей / А. М. Довгалев, Н. А. Леванович, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2010. – № 4. – С. 55–65.

3. **Шнейдер, Ю. Г.** Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства / Ю. Г. Шнейдер. – Л. : Машиностроение, 1972. – 240 с.

4. **Минаков, А. П.** Исследование влияния пневмовибродинамической обработки на эксплуатационные свойства обработанной поверхности / А. П. Минаков, Е. В. Ильюшина // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2006. – № 1. – С. 172–176.

5. **Абрамова, Н. Б.** Исследование качества поверхности медных гильз кристаллизаторов МНЛЗ / Н. Б. Абрамова // Технология машиностроения. – 2007. – № 6. – С. 12–14.

6. **Васильков, Д. В.** Эффективность использования международных стандартов при контроле микрогеометрии поверхностей деталей / Д. В. Васильков, Д. Ю. Печенюк // Инструмент. – 2002. – № 12. – С. 6–7.

Статья сдана в редакцию 22 июня 2016 года

Сергей Александрович Сухоцкий, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет. E-mail: darvin_serg@mail.ru.

Sergey Aleksandrovich Sukhotsky, senior lecturer, Belarusian-Russian University. E-mail: darvin_serg@mail.ru.

УДК 629.3

В. П. Тарасик, В. С. Савицкий

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМА УПРАВЛЕНИЯ ФРИКЦИОНАМИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ

UDC 629.3

V. P. Tarasik, V. S. Savitsky

EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE AUTOMATIC TRANSMISSION FRICTION CLUTCHES CONTROL

Аннотация

Приведены результаты экспериментальных исследований механизма управления фрикционами мехатронной системы переключения передач автоматической трансмиссии. Получены статические и переходные характеристики механизма и его компонентов. Определены оптимальные параметры настройки регулятора тока контроллера управления. Исследовано влияние осцилляции управляющего сигнала на гистерезис статической характеристики механизма управления.

Ключевые слова:

автоматическая коробка передач, механизм управления фрикционами, контроллер управления, пропорциональный электромагнит, регулятор давления, гистерезис статической характеристики.

Abstract

The paper presents the results of the experimental research on the mechanism to control friction clutches of the mechatronic system of automatic transmission gear shift. Static and transient characteristics of the mechanism and its components have been obtained. The optimal parameters for the adjustment of the current controller of the master controller have been determined. The influence of the control signal oscillation on the hysteresis of static characteristics of the control mechanism has been studied.

Key words:

automatic gearbox, friction clutch control mechanism, master controller, proportional electromagnet, pressure regulator, hysteresis of static characteristics.

Управление современными автоматическими коробками передач осуществляется посредством мехатронных систем, позволяющих реализовать сложные адаптивные алгоритмы, обеспечивающие высокое качество процессов функционирования механизмов трансмиссии и эффективность эксплуатации автомобиля. Наиболее сложной при создании автоматической трансмиссии представляется проблема управления переключением передач. Движение автомобиля в процессе переключения передач должно быть плавным, без рывков и резких ускорений или торможений, обеспечивать комфортные условия водителю и пассажирам. Это достигается высокой степенью согласованности функционирования всех компонентов системы, осуществляющих управление фрикционами коробки передач.

На рис. 1 представлена функциональная схема механизма управления фрикционами. В состав механизма входят следующие элементы: задающий элемент ЗЭ; преобразующий элемент ПЭ; широтно-импульсный модулятор ШИМ микропроцессорного контролле-

© Тарасик В. П., Савицкий В. С., 2016

ра управления автоматической трансмиссией; пропорциональный электромагнит (ЭМ), содержащий обмотку ОЭМ, магнитопровод и якорь ЯЭМ; регулятор давления рабочей жидкости РД; регулятор-распределитель РР; гидроцилиндр фрикциона ГЦФ; фрикцион переключения передачи ФПП.

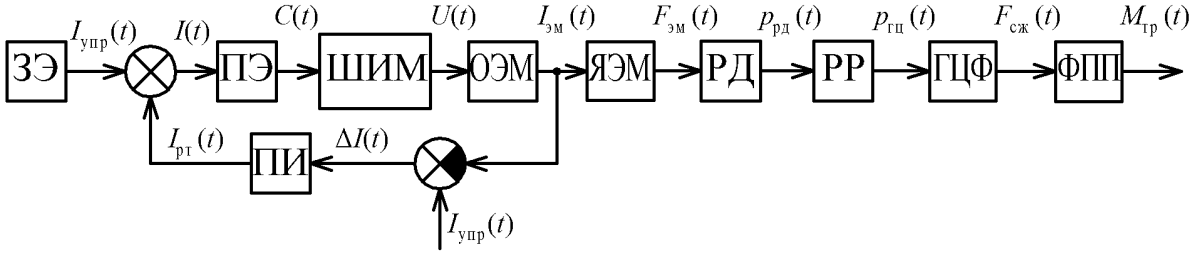


Рис. 1. Функциональная схема механизма управления фрикционами

Контроллер управления определяет оптимальные условия и своевременность переключения передач и формирует характеристику управления фрикционом, реализуемую на выходе задающего элемента ЗЭ в виде характеристики изменения во времени тока управления $I_{упр}(t)$. Элемент ПЭ преобразует эту характеристику в дискретный сигнал, определяющий величину скважности $C(t)$ сигнала, формируемого ШИМ на его выходе. Скважность сигнала ШИМ определяет среднюю величину напряжения $U(t)$, подаваемого на обмотку электромагнита ОЭМ. В результате под действием создаваемого магнитного потока в магнитопроводе возникает сила воздействия на якорь ЭМ $F_{эм}(t)$, пропорциональная силе тока в обмотке $I_{эм}(t)$. Якорь ЭМ через шток непосредственно оказывает воздействие на запорно-регулирующий орган регулятора давления РД, вследствие чего на его выходе формируется сигнал давления рабочей жидкости $p_{рд}(t)$, величина которого пропорциональна силе тока в обмотке ЭМ $I_{эм}(t)$.

Назначение регулятора-распределителя заключается в усилении мощности потока рабочей жидкости, подаваемой в гидроцилиндр фрикциона в процессе его включения. После заполнения гидроцилиндра характеристика давления рабочей жидкости в его полости $p_{гц}(t)$, поддерживаемая РР, несколько отличается от давления $p_{рд}(t)$, но изменяется почти пропорционально силе тока в обмотке ЭМ $I_{эм}(t)$.

В процессе управления включением фрикциона происходит нагрев обмотки ЭМ и ее сопротивление изменяется, что приводит к отклонению характеристики тока $I_{эм}(t)$ от характеристики тока управления $I_{упр}(t)$. Для поддержания требуемой характеристики тока ЭМ $I_{эм}(t)$ в контроллере предусмотрен регулятор, обеспечивающий пропорционально-интегральный закон управления величиной тока (ПИ-регулятор). На его вход подаётся сигнал отклонения $\Delta I(t)$ тока в обмотке ЭМ $I_{эм}(t)$ от величины тока управления $I_{упр}(t)$, представляющий собой разность между ними, т. е.

$$\Delta I(t) = I_{упр}(t) - I_{эм}(t). \qquad (1)$$

На выходе ПИ-регулятора формируется сигнал $I_{рт}(t)$, определяемый выражением

$$I_{\text{рт}}(t) = k_{\text{рт}}\left[\Delta I(t) + \frac{1}{T_{\text{и}}}\int_0^t \Delta I(t)dt\right], \quad (2)$$

где $k_{\text{рт}}$ – коэффициент передачи регулятора; $T_{\text{и}}$ – постоянная времени интегрирования; t – текущее время.

Получаемый выходной сигнал ПИ-регулятора $I_{\text{рт}}(t)$ складывается с сигналом управления $I_{\text{упр}}(t)$, и их сумма $I(t) = I_{\text{упр}}(t) + I_{\text{рт}}(t)$ поступает на вход ПЭ. В результате происходит корректировка напряжения $U(t)$ на выходе ШИМ, что позволяет обеспечивать поддержание требуемой характеристики регулирования давления $p_{\text{рд}}(t)$.

Для проектирования механизмов управления фрикционом (МУФ) необходимо располагать характеристиками и параметрами всех компонентов, входящих в его состав. Наиболее достоверные характеристики можно получить посредством проведения экспериментов.

Рассмотрим результаты экспериментов, проведенных над компонентами МУФ, разработанными по заданию АТ-06.22 ГНТП «Машиностроение» в течение 2010…2013 гг. [9, 10]. Производство этих компонентов осуществляет ОАО «Измеритель» (г. Новополоцк). Испытаниям подвергались контроллер, пропорциональный электромагнит, регулятор давления и регулятор-распределитель. Результаты испытаний гидравлических компонентов МУФ подробно изложены в [1–5], в статье же представлены материалы экспериментов над пропорциональным ЭМ и при его взаимодействии с контроллером и регулятором давления. В первую очередь проведены испытания ЭМ с целью определения его статических и динамических характеристик.

На рис. 2 показаны переходные характеристики при включении ЭМ.

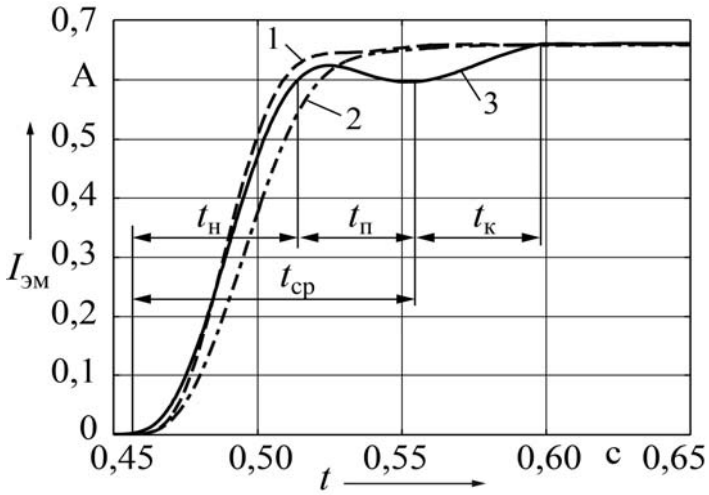


Рис. 2. Переходные характеристики при включении ЭМ от источника постоянного напряжения

Источник питания – аккумулятор с номинальным напряжением 12 В. Графики иллюстрируют изменение тока в обмотке ЭМ во времени при ступенчатом (скачкообразном) характере подачи напряжения. График 1 соответствует блокировке якоря в исходном положении, график 2 – блокировке в конечном положении; график 3 получен при поднятии электромагнитом груза массой $m_{\text{гр}}$ = 2 кг в процессе перемещения якоря ЭМ из исходного состояния в конечное.

Графики 1 и 2 имеют вид типовой переходной характеристики апериодического звена второго порядка [6]. Переходная характеристика этого звена соответствует выражению

$$I_{\text{эм}}(t) = \begin{pmatrix} 1 + \dfrac{T_1}{T_2 - T_1} e^{-t/T_1} - \\ - \dfrac{T_2}{T_2 - T_1} e^{-t/T_2} \end{pmatrix} k \cdot 1(t), \quad (3)$$

где T_1 и T_2 – постоянные времени; k – коэффициент передачи звена; $1(t)$ – функция единичного ступенчатого воздействия (в рассматриваемом случае воздействием является напряжение аккумуляторной батареи U).

Постоянные времени T_1 и T_2 определяются по методике, изложенной в [6, с. 124]. Для графика 1 получено $T_1 = 0{,}0103$ с; $T_2 = 0{,}0128$ с, для графика 2 – $T_1 = 0{,}0160$ с; $T_2 = 0{,}0115$ с.

График 3 существенно отличается от графиков 1 и 2. Согласно этому графику, после подачи ступенчатого воздействия $U(t)$ в течение интервала времени $t_{\text{н}}$ происходит нарастание тока в обмотке ЭМ $I_{\text{эм}}(t)$ при неподвижном якоре, находящемся в исходном положении, и, соответственно, возрастает развиваемое им усилие $F_{\text{эм}}(t)$. В конце этого интервала величина усилия $F_{\text{эм}}(t)$ оказывается достаточной для преодоления силы тяжести груза $m_{\text{гр}}g$, и якорь ЭМ начинает перемещаться, поднимая груз. При движении якоря на интервале времени $t_{\text{п}}$ возникает противоЭДС, направленная противоположно напряжению источника питания, что приводит к снижению тока в обмотке ЭМ, т. е. к спаду кривой $I_{\text{эм}}(t)$ [7]. После остановки якоря в конечном положении ток $I_{\text{эм}}(t)$ опять начинает возрастать на интервале времени $t_{\text{к}}$ до конечного значения $I_{\text{эм.max}}$, но с меньшей интенсивностью, чем на интервале $t_{\text{н}}$, т. к. в новом положении якоря индуктивность обмотки ЭМ иная. Интервал времени $t_{\text{ср}} = t_{\text{н}} + t_{\text{п}}$ называют временем срабатывания ЭМ; время переходного процесса – $t_{\text{пп}} = t_{\text{н}} + t_{\text{п}} + t_{\text{к}}$.

Уравнение баланса напряжений на обмотке ЭМ при перемещении якоря имеет вид:

$$U_0 = I_{\text{эм}} R + L \frac{dI_{\text{эм}}}{dt} + I_{\text{эм}} \frac{dL}{dt}, \quad (4)$$

где U_0 – напряжение источника питания, В; $I_{\text{эм}}$ – ток в обмотке ЭМ, А; R – активное сопротивление обмотки, Ом; L – индуктивность ЭМ, Гн.

Первое слагаемое в этом уравнении представляет собой падение напряжения на активном сопротивлении обмотки. Второе слагаемое – это ЭДС самоиндукции. Третье слагаемое обусловлено изменением индуктивности при перемещении якоря. Оно возникает только при перемещении якоря, а при неподвижном якоре равно нулю.

Но в реальных условиях функционирования механизма управления фрикционом управление электромагнитом осуществляет контроллер посредством широтно-импульсного модулятора. Цепь питания ЭМ снабжена обратной связью, в которую включен ПИ-регулятор тока (см. рис. 1). Переходная характеристика тока ЭМ в этом случае оказывается совершенно иной по сравнению с управлением от источника постоянного напряжения.

На рис. 3 показана переходная характеристика $I_{\text{эм}} = f(t)$ при подаче ступенчатого управляющего сигнала $I_{\text{упр}} = 0{,}4$ А (см. рис. 1). Очевидно, что переходная характеристика тока в обмотке ЭМ в этом случае имеет колебательный характер, причём её параметры зависят от величины коэффициентов пропорциональной $k_{\text{п}}$ и интегральной $k_{\text{и}}$ со-

ставляющих ПИ-регулятора. В контроллерах производства ОАО «Измеритель» значение $k_п$ можно изменять в диапазоне от 0 до 100, а $k_и$ – от 0 до 50.

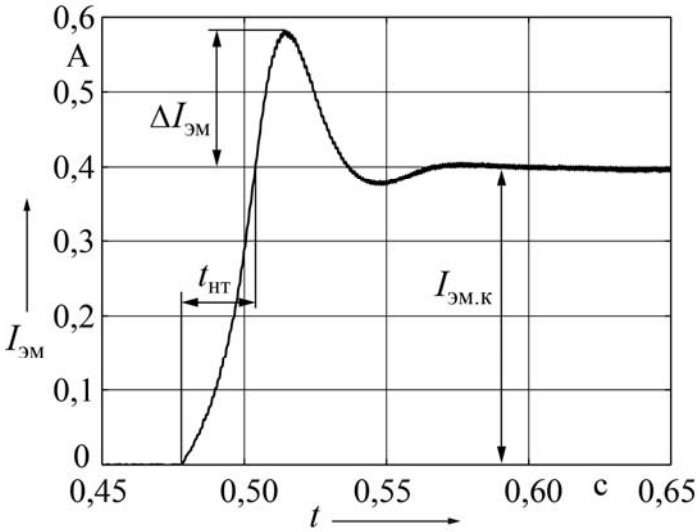


Рис. 3. Переходная характеристика электромагнита при управлении от контроллера

Для оценки получаемой переходной характеристики примем два критерия качества: время запаздывания нарастания тока $t_{нт}$ от 0 до заданной конечной величины $I_{эм.к}$ и относительное перерегулирование тока $k_{пт}$, вычисляемое по формуле

$$k_{пт} = 1 + \Delta I_{эм} / I_{эм.к}, \qquad (5)$$

где $\Delta I_{эм}$ – абсолютная величина перерегулирования тока (см. рис. 3).

Для выявления влияния коэффициентов $k_п$ и $k_и$ настройки ПИ-регулятора тока на принятые критерии качества переходной характеристики $t_{нт}$ и $k_{пт}$ был проведен планируемый эксперимент и получена регрессионная модель системы управления. В качестве искомых уравнений регрессий принят квадратный полином вида

$$y_j = b_{0j} + b_{1j}x_1 + b_{2j}x_2 + \\ + b_{3j}x_1x_2 + b_{4j}x_1^2 + b_{5j}x_2^2;$$

$$j = \overline{1,2}, \qquad (6)$$

где x_1, x_2 – нормированные значения факторов (параметров $k_п$ и $k_и$, подлежащих оптимизации); y_j – j-я функция отклика (критерии качества $k_{пт j}$ и $t_{нт j}$); b_{0j}, $b_{1j}, \ldots, b_{5j}$ – коэффициенты j-го уравнения регрессии.

Нормирование факторов осуществляется на основе соотношения

$$x_i = (X_i - X_i^0) / \Delta X_i; \quad i = \overline{1,n}, \qquad (7)$$

где X_i – натуральное значение i-го фактора на нижнем или верхнем уровне варьирования; X_i^0 – натуральное значение i-го фактора в центре плана; ΔX_i – интервал варьирования; n – количество факторов.

При проведении эксперимента варьирование факторов проводили в соответствии с табл. 1.

Использован план второго порядка типа B_n, методика проведения которого

изложена в [8]. Количество опытов N при проведении экспериментов по этому плану вычисляется по формуле

$$N = 2^n + 2n\,. \qquad (8)$$

Результаты эксперимента приведены в табл. 2.

Значения коэффициентов регрессий и оценки адекватности и работоспособности полученных регрессионных моделей приведены в табл. 3.

Табл. 1. Значения факторов на уровнях варьирования при проведении эксперимента

Обозначение фактора		Натуральное значение фактора		
натуральное	нормированное	на нижнем уровне ($x_i = -1$)	в центре плана ($x_i = 0$)	на верхнем уровне ($x_i = +1$)
$k_{\text{П}}$	x_1	5	40	75
$k_{\text{И}}$	x_2	5	25	45

Табл. 2 Значения функций отклика в точках плана эксперимента

Номер опыта	Значение функции отклика в точке плана эксперимента	
	y_1	y_2
1	1,46425	29,0
2	1,06875	22,6
3	1,45625	27,9
4	1,06225	22,9
5	1,45675	28,6
6	1,06900	22,4
7	1,17750	23,2
8	1,17725	22,0

Табл. 3. Параметры регрессионных моделей

Коэффициент регрессии	Значение коэффициента регрессии и оценка адекватности модели	
	$k_{\text{нт}j}$	$t_{\text{нт}}$
b_0	1,177375	22,5
b_1	–0,19621	–2,93333
b_2	–0,00246	–0,33333
b_3	0,000375	0,35
b_4	0,0855	3,0
b_5	$-2{,}1\cdot10^{-16}$	0,1
Среднее значение функций отклика $\overline{y}$	1,2415	24,825
Дисперсия модели среднего S_y^2	0,034574	9,4707

Окончание табл. 3

Коэффициент регрессии		Значение коэффициента регрессии и оценка адекватности модели	
		$k_{\text{пт}j}$	$t_{\text{нт}}$
Остаточная дисперсия $S^2_{\text{ост}}$		$1{,}63\cdot10^{-5}$	0,14833
Критерий Фишера	расчетный F	2116,8	63,8
	табличный $F_{\text{т}}$	19,3	19,3
Коэффициент детерминации R^2		0,999	0,995

На рис. 4 приведены графики зависимостей критериев качества от нормированных значений оптимизируемых параметров, вычисленных по уравнениям регрессий (6).

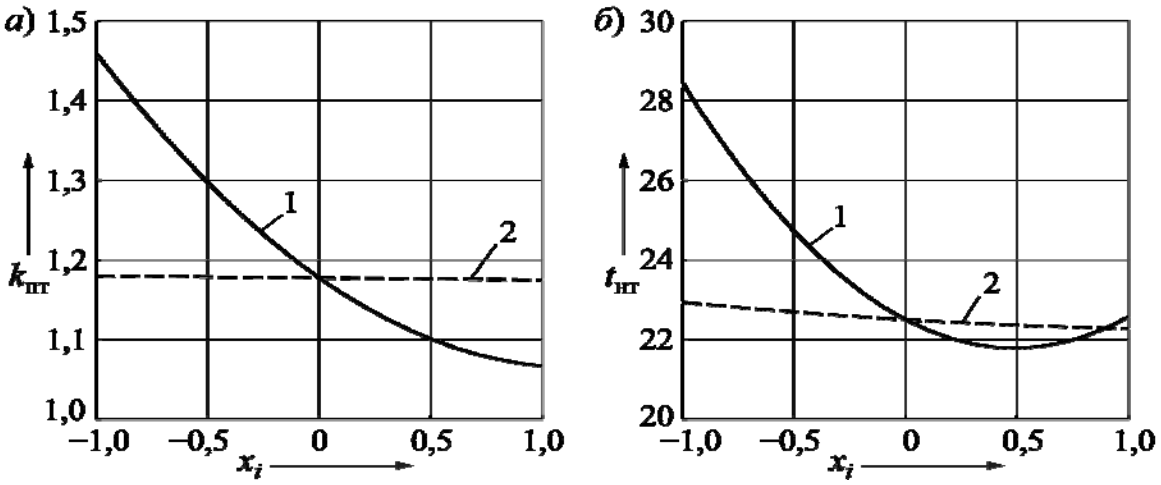


Рис. 4. Зависимости функций отклика $k_{\text{пт}}$ и $t_{\text{нт}}$ от нормированных факторов $x_i, i = 1, 2$

Полученная регрессионная модель использована для оптимизации коэффициентов $k_{\text{п}}$ и $k_{\text{и}}$ настройки ПИ-регулятора тока контроллера управления автоматической трансмиссией. Оптимизация осуществлялась на основе минимаксной стратегии. Целевая функция минимакса $F(\vec{X})$ при наличии регрессионной математической модели объекта формируется согласно выражению [8]

$$F(\vec{X}) = \sum_{j=1}^{m} c_j \left(\frac{y_j(\vec{X}) - y_{j\,extr}}{y_{j\max} - y_{j\min}} \right)^2, \quad (9)$$

где $y_j(\vec{X})$ – зависимость j-го критерия от вектора оптимизируемых параметров $\vec{X} = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$; n – количество оптимизируемых параметров; $y_{j\,extr}$ – экстремальное значение j-го критерия; $y_{j\min}, y_{j\max}$ – минимальное и максимальное значения j-го критерия, достигаемые в области варьирования факторов $\vec{X}$ (находятся по графикам на рис. 5); c_j – коэффициент веса, характеризующий значимость j-го критерия; m – количество критериев.

Коэффициенты веса выбирают из условия

$$\sum_{j=1}^{m} c_j = 1;\ c_j > 0. \qquad (10)$$

Оптимальные значения параметров соответствуют минимуму целевой функции. При $c_1 = c_2 = 0{,}5$ получены следующие значения искомых оптимальных коэффициентов: $k_{\text{п}} = 65{,}328$, $k_{\text{и}} = 37{,}899$. Показатели качества при этом $k_{\text{пт}} = 1{,}079$, $t_{\text{нт}} = 21{,}939$. В выбранном диапазоне варьирования факторами (см. табл. 1) наихудшие значения показателей качества $k_{\text{и}} = 1{,}459$, $t_{\text{нт}} = 28{,}43$. Таким образом, в результате выполненных исследований удалось снизить относительное перерегулирование тока в 1,35 раза, а время запаздывания нарастания тока – в 1,3 раза.

На рис. 5 приведен график переходной характеристики изменения тока в обмотке ЭМ, полученный экспериментально при оптимальных параметрах настройки регулятора тока контроллера (изображён сплошной линией).

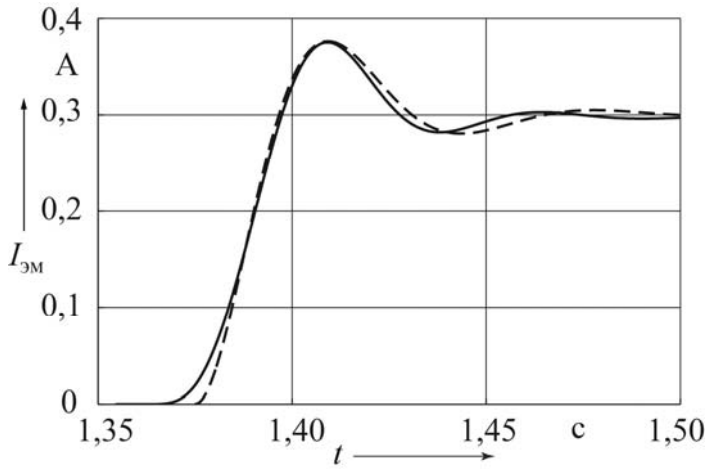


Рис. 5. График переходной характеристики при оптимальных параметрах

На основе этого графика определены параметры переходной характеристики, необходимые для построения математической модели функционирования ЭМ в системе автоматического управления переключением передач. Переходная характеристика колебательного звена описывается выражением [6]

$$I_{\text{эм}}(t) = \frac{U_0}{R}\left[1 - e^{-\alpha t}\left(\cos(\beta t) + \frac{\alpha}{\beta}\sin(\beta t)\right)\right], \qquad (11)$$

где α – коэффициент затухания колебаний, рад/с; β – частота затухающих колебаний, рад/с.

Значения α и β находятся по формулам:

$$\alpha = \frac{2}{\tau}\ln\left|\frac{A_1}{A_2}\right|; \qquad (12)$$

$$\beta = 2\pi / \tau, \qquad (13)$$

где A_1 и A_2 – первая и вторая амплитуды колебаний соответственно; τ – период затухающих колебаний, с.

Значения A_1, A_2 и τ измеряют непосредственно по графику полученной записи осциллограммы изменения тока в обмотке ЭМ [6].

Дифференциальное уравнение изменения тока в обмотке ЭМ имеет вид:

$$T^2 d^2 I_{эм} / dt^2 + 2\xi T\, dI_{эм} / dt + \\ + I_{эм} = kU, \qquad (14)$$

где T – постоянная времени, с; ξ – относительный коэффициент затухания; k – коэффициент передачи.

Значения T и ξ вычисляют по формулам:

$$T = 1 / \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}; \qquad (15)$$

$$\xi = \alpha / \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}. \qquad (16)$$

Получены следующие значения параметров: $\alpha = 51{,}679$ рад/с; $\beta = 116{,}355$ рад/с; при этом $T = 8{,}091 \cdot 10^{-3}$ с, $\xi =$ 0,41937. Переходная характеристика, построенная по формуле (11), представлена на рис. 5 (штриховая линия).

Дальнейшие испытания проводились в полнокомплектном составе МСАУ. В её состав входили все компоненты, изображённые на функциональной схеме, представленной на рис. 1. Основное внимание при этом было сосредоточено на исключении резонансных колебаний давления на выходе регулятора-распределителя, снижении амплитуд этих колебаний и уменьшении ширины петли гистерезиса статической характеристики ЭГПК. Основная причина гистерезиса – сухое трение между перемещаемыми относительно друг друга механическими элементами механизмов. Сухое трение в сопряжениях золотника регулятора-распределителя с его корпусом, якоря и штока ЭМ относительно опорных поверхностей приводит к увеличению амплитуд колебаний управляемого давления рабочей жидкости.

На рис. 6, *а* приведена статистическая характеристика ЭГПК, представляющая собой зависимость давления на его выходе $p_{гц}$ от тока в обмотке $I_{эм}$.

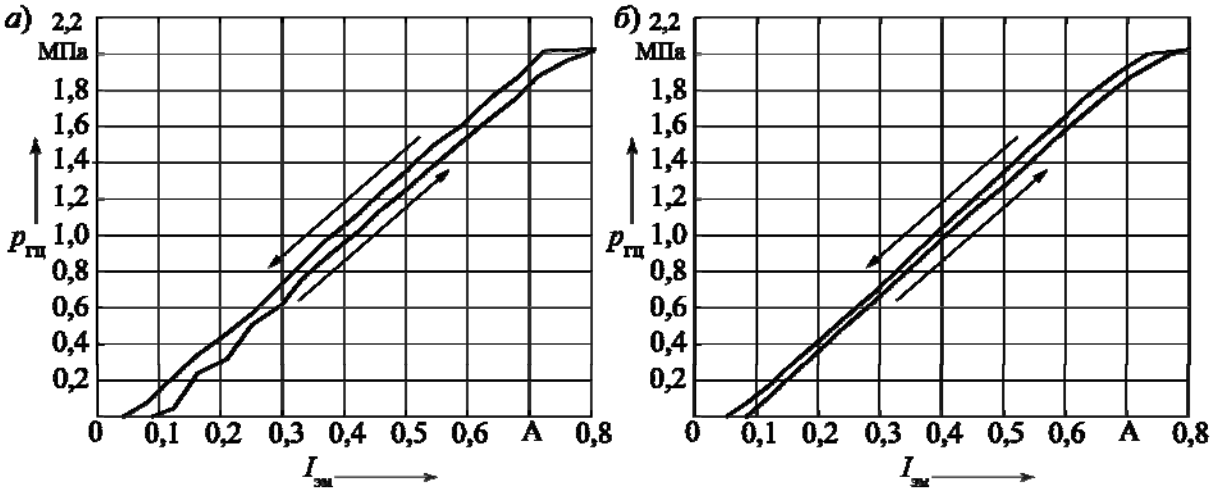


Рис. 6. Статическая характеристика ЭГПК без осцилляции управляющего сигнала контроллера (*а*) и с осцилляцией (*б*)

Питание обмотки ЭМ осуществлялось от ШИМ контроллера. Стрелками показано направление изменения тока при испытаниях. Из полученной характеристики видно, что статическая характеристика имеет петлю гистерезиса значительной величины. Величину гистерезиса G оценивали по формуле

$$G = \frac{\Delta p_{\text{гц}}}{p_{\text{гц.max}}} \cdot 100\ \%, \qquad (17)$$

где $\Delta p_{\text{гц}}$ – ширина петли гистерезиса, МПа; $p_{\text{гц.max}}$ – максимальное давление, соответствующее максимальному значению тока $I_{\text{эм.max}}$, подаваемого в обмотку ЭМ.

Значение величины гистерезиса находится в пределах 7…8 %, а при низких значениях тока статическая характеристика ЭМ становится нелинейной.

Один из способов «борьбы» с гистерезисом заключается в обеспечении осциллирующих относительных перемещений сопрягаемых подвижных элементов. Это можно обеспечить осцилляцией тока, подаваемого в обмотку ЭМ.

В контроллере производства ОАО «Измеритель» рабочая частота ШИМ составляет 1000 Гц. Она значительно выше собственной частоты колебаний подвижных деталей ЭМ и взаимодействующего с ним регулятора давления и регулятора–распределителя. Поэтому на этой частоте их колебания не возникают. Но в контроллере предусмотрена возможность создания осцилляции тока на нескольких фиксированных частотах, а именно на частотах 66, 100, 166, 200 и 250 Гц. Амплитуда осцилляции задаётся в битах в диапазоне от 0 до 80, при этом 1 бит равен 2,5 мА.

На рис. 7 приведены графики, отображающие характер изменения тока, подаваемого в обмотку ЭМ без осцилляции (схема *а*) и с осцилляцией (схема *б*). Период изменения тока без осцилляции, формируемый ШИМ контроллера, обозначен $t_{\text{шим}}$, а период осцилляции тока – $t_{\text{осц}}$.

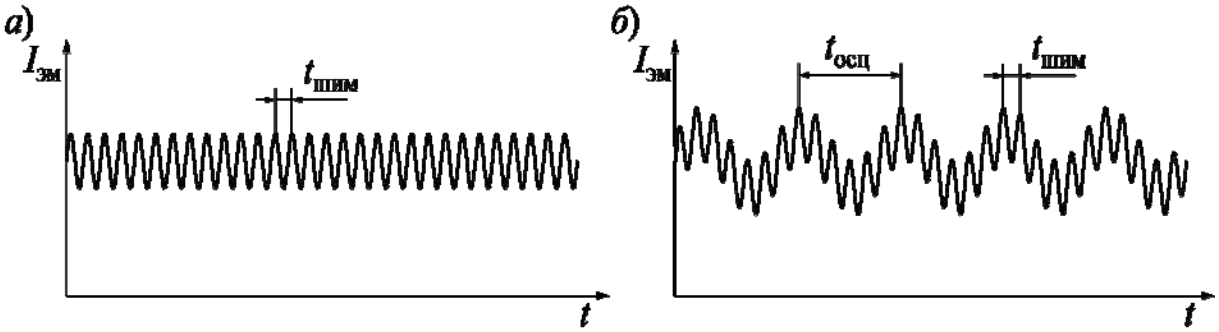


Рис. 7. Схемы управляющего сигнала без осцилляции (*а*) и с осцилляцией (*б*)

Были проведены экспериментальные исследования по выявлению влияния параметров осцилляции тока на величину гистерезиса статической характеристики механизма управления фрикционом, представляющей собой зависимость давления на выходе регулятора-распределителя от управляющего тока в обмотке ЭМ. Варьировались различные сочетания параметров осцилляции. На рис. 8 представлены результаты этих исследований.

Установлено, что при неудачно выбранных сочетаниях параметров могут возникать колебания регулируемого давления рабочей жидкости на выходах регулятора давления и регулятора-распределителя вследствие увеличения амплитуды тока в обмотке ЭМ. Такие результаты на рис. 8 не отображались. Согласно рисунку, при управлении без осцилляции величина гистерезиса характеристики давления составляет 7,24 %. При использовании осцилляции гистерезис снижается. Минимальное его значение получено при частоте 166 Гц и

амплитуде 37,5 мА и составляет 4,25 %. Статическая характеристика при этих параметрах приведена на рис. 6, *б*. Получена линейная характеристика на всём интервале изменения тока в обмотке электромагнита.

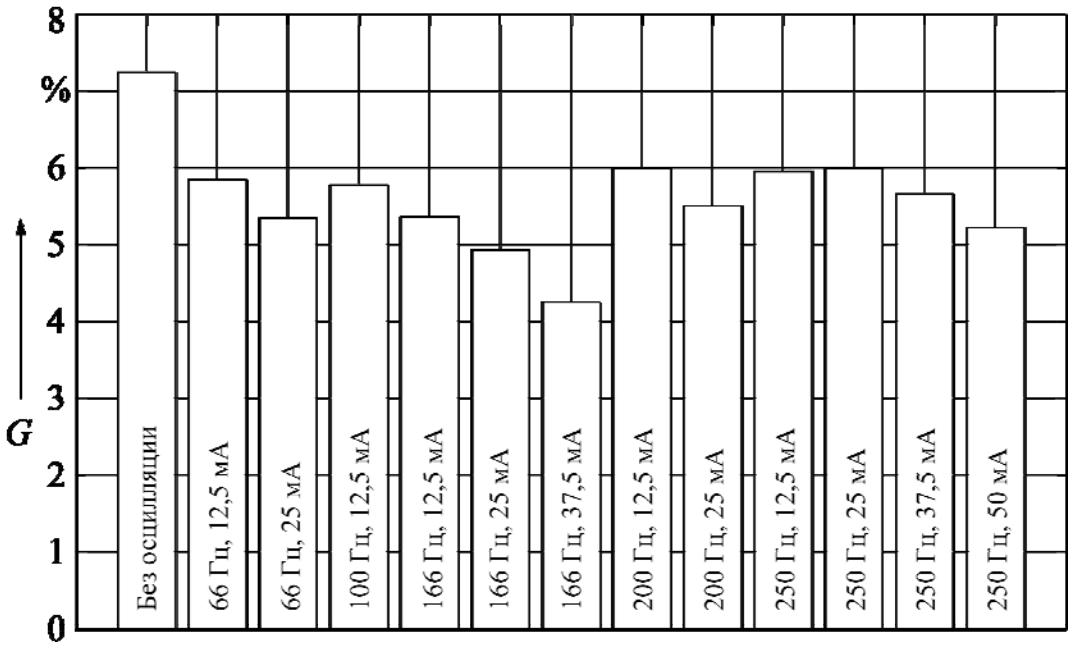


Рис. 8. Результаты исследований по выбору параметров осцилляции управляющего сигнала

Таким образом, в результате проведенного комплекса экспериментальных исследований механизма управления фрикционами автоматической коробки передач и его основных компонентов достигнуты существенное улучшение характеристик и параметров функционирования всех элементов системы и высокое качество переходных процессов при переключении передач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тарасик, В. П.** Электрогидравлический механизм управления фрикционами гидромеханической передачи / В. П. Тарасик, Ю. С. Романович, В. С. Савицкий // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2012. – № 2. – С. 89–100.

2. **Тарасик, В. П.** Исследование характеристик электрогидравлических пропорциональных клапанов / В. П. Тарасик, Н. Н. Горбатенко, В. С. Савицкий // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2014. – № 1. – С. 52–65.

3. **Тарасик, В. П.** Экспериментальное исследование характеристик пропорционального редукционного клапана с электронным управлением / В. П. Тарасик, Н. Н. Горбатенко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2013. – № 2. – С. 15–25.

4. Мехатронная система автоматического управления гидромеханической передачей карьерного самосвала / В. П. Тарасик, Н. Н. Горбатенко, А. Н. Егоров, В. В. Региня // Автомобильная промышленность. – 2010. – № 4. – С. 16–19.

5. Мехатронная система автоматического управления гидромеханической передачей карьерного самосвала / В. П. Тарасик, Н. Н. Горбатенко, А. Н. Егоров, В. В. Региня // Автомобильная промышленность. – 2010. – № 6. – С. 12–15.

6. **Ксеневич, И. П.** Теория и проектирование автоматических систем : учебник для вузов / И. П. Ксеневич, В. П. Тарасик. – М. : Машиностроение, 1996. – 479 с.

7. Основы теории электрических аппаратов ; учебник для вузов / И. С. Таев [и др.] ; под ред. И. С. Таева. – М. : Высш. шк., 1987. – 352 с.: ил.

8. **Тарасик, В. П.** Математическое моделирование технических систем : учебник для вузов / В. П. Тарасик. – Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2016. – 592 с.

9. Двухступенчатый электрогидравлический механизм управления давлением : пат. 2 459 982 РФ, МПК F 15 B 13/043; F 16 H 61/06 / В. П. Тарасик, Н. Н. Горбатенко, И. М. Дычкин ; заявитель и патентообладатель Белорус.-Рос. ун-т ; заявл. 30.11.10 ; опубл. 27.08.12. – Бюл. № 24. – 13 с.

10. Селектор режимов управления автоматической трансмиссией автомобиля : пат. 2 551 786 РФ, МПК F 16 H 59/02 / В. П. Тарасик, В. И. Курстак, Р. В. Плякин ; заявитель и патентообладатель Белорус.-Рос. ун-т ; заявл. 26.11.13 ; опубл. 27.05015. – Бюл. № 15. – 23 с.

Статья сдана в редакцию 11 мая 2016 года

Владимир Петрович Тарасик, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0222-25-36-45.
Виктор Сергеевич Савицкий, ведущий инженер, Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0222-79-80-85.

Vladimir Petrovich Tarasik, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-222-25-36-45.
Viktor Sergeyevich Savitsky, senior engineer, Belarusian-Russian University. Phone: +375-222-79-80-85.

УДК 669.017

А. С. Федосенко, Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко

ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ ПОЛУЧЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИ ЛЕГИРОВАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ НАПЫЛЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

UDC 669.017

A. S. Fedosenko, F.G. Lovshenko, G.F. Lovshenko

OPTIMIZATION OF PRODUCING MECHANICAL ALLOYED COMPOSITE POWDER MATERIALS FOR WEAR-RESISTANT SPRAYED PLASMA COATINGS

Аннотация

Приведены результаты исследований, направленных на установление оптимального химического состава исходной шихты и времени ее обработки в механореакторе с целью получения композиционных порошков для плазменного напыления покрытий, отличающихся высокой твердостью и износостойкостью, а также изучено влияние условий напыления разработанных порошков на плотность покрытий и определено их оптимальное значение.

Ключевые слова:

механическое легирование, порошки, газотермическое напыление, плазменные покрытия, твердость, плотность, износостойкость, пористость.

Abstract

The paper presents the results of the research aimed at establishing the optimal chemical composition of the initial charge and time of its processing in the mechanoreactor in order to produce composite powders for plasma spraying of coatings, characterized by high hardness and wear resistance; the influence of spray conditions of developed powders upon coatings density has been studied and their optimal value has been determined.

Key words:

mechanical alloying, powders, gas-thermal spraying, plasma coatings, hardness, density, wear resistance, porosity.

Введение

Одними из важнейших факторов, определяющих возможность получения газотермических покрытий высокой твердости и износостойкости, являются свойства наносимого материала. Во многом они определяются его химическим составом и в значительной степени наследуются формируемым покрытием. В случае получения порошковых материалов по технологии реакционного механического легирования на их свойства оказывает влияние не только химический состав синтезируемого материала, но и технологические параметры обработки исходной композиции в механореакторе [1, 2].

Одним из важных параметров сформированного покрытия, обеспечивающим заданный комплекс физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик, является его плотность [3], которая зависит от большого количества факторов, включающих как характеристики применяемого материала, так и условия напыления.

© Федосенко А. С., Ловшенко Ф. Г., Ловшенко Г. Ф., 2016

Целью работы являлось установление оптимальных условий получения механически легированных порошковых материалов, а также плазменных покрытий из них, отличающихся высокой твердостью и износостойкостью.

Методика исследований

Исследования проводились на композициях следующих систем: Fe–Al–Fe_2O_3, Fe–Cr–C, Fe–Ni–Cr–C–(Fe_2O_3 + Al), Ni–Al, Al_2O_3–13 % TiO_2–Ni–Al.

Механическое легирование исследуемых порошковых композиций проводилось при следующих режимах работы механореактора: ускорение рабочих тел – $a_н$ = 135 м·с$^{-2}$; отношение объема рабочих тел к шихте – k = 12; заполнение помольной камеры рабочими телами – ε = 75 %. Время обработки τ варьировалось в интервале 6…12 ч.

Напыление порошков проводилось с использованием дугового плазмотрона оригинальной конструкции (аналог ПУН-1), работающего на воздушно-пропановой плазмообразующей смеси. Порошок подавался на срез сопла. При исследовании влияния параметров процесса напыления на плотность покрытий базовые режимы нанесения слоев из материалов на основе материалов составляли: сила тока – 220 А; напряжение – 200 В; дистанция напыления – 250 мм; диаметр отверстия подающей трубки – 2 мм; расстояние от среза сопла до выходного отверстия подающей трубки – 5 мм. Получение покрытий из композиционных материалов на основе системы Fe–Cr–C и Al_2O_3–TiO_2 проводилось со следующими корректировками: дистанция напыления – 150 мм; диаметр отверстия подающей трубки – 1,7 мм.

Оптимизация условий напыления проводилась на материалах, химический состав и условия синтеза которых представлены в табл. 1.

Табл. 1. Базовые композиции и условия их получения

Состав композиции	Режимы механосинтеза	Температура отжига, К
Fe–30 % Al	$a_н$ = 135 м·с$^{-2}$; k = 12; ε = 75 %; τ = 8 ч	870
Fe–30 % Al–14,13 % Fe_2O_3		870
Ni– 5 % Al		–
40Х13		570
Al_2O_3–13 % TiO_2		–

Основные результаты исследований

Оптимизация состава исходной шихты и продолжительности механосинтеза исследуемых композиций

Исследования проводились на материалах следующих систем: Fe–30 % Al–Fe_2O_3, Fe–Cr–C, Fe–Ni–Cr–C, Al_2O_3–13 % TiO_2–Ni–Al. Оптимизация химического состава и времени обработки материалов проводилась в два этапа. На первом методом однофакторного эксперимента устанавливались граничные значения переменных факторов. На втором для определения совместного влияния параметров, обеспечивающих получение покрытий с максимально высокими свойствами, реализовывался полнофакторный эксперимент, результаты которого обрабатывались с применением метода центрального ортогонального планирования второго порядка.

Влияние состава исходной шихты и времени ее обработки в механореакторе на твердость и износостойкость покрытий из материалов системы Fe–Al.

При описании области оптимума параметрами оптимизации являлись твердость формируемого покрытия и его износостойкость, переменными факторами – время обработки шихты в механореакторе и содержание легирующей добавки. Средние значения параметров оптимизации получены по результатам двух параллельных опытов.

Базовым материалом системы является композиция Fe–30 % Al. В качестве легирующей добавки, предназначенной для синтеза упрочняющей фазы (Al_2O_3), в нее дополнительно вводился оксид железа Fe_2O_3. Количество вводимого оксида железа рассчитывалось из условия образования от 1 до 10 % оксида алюминия и составляло 1,57…15,7 %. Время обработки варьировалось в диапазоне 6…12 ч.

На первом этапе исследований было установлено, что увеличение времени обработки шихты в механореакторе и количества вводимого в нее оксида железа приводят к росту твердости покрытий получаемых из синтезируемых порошков. Изменение износостойкости носит аналогичный характер.

Для установления совместного влияния состава шихты и времени обработки на свойства формируемых покрытий был реализован центральный композиционный ортогональный план второго порядка. При этом исследования проводились на материалах с содержанием оксида железа, равным 9,42…15,7 %, и временем обработки шихты 8…12 ч.

По результатам статистической обработки экспериментальных данных получены математические модели, адекватно представляющие результаты экспериментов:

1) твердость газотермических покрытий

$$HV = 602 + 21x_1 + 22x_2 - 10x_2^2\ ; \quad (1)$$

2) относительная износостойкость

$$I_{отн} = 1{,}41 + 0{,}19x_1 + 0{,}07x_2 - 0{,}11x_1^2\ . \quad (2)$$

Графическая интерпретация моделей, показывающая зависимость исследуемых параметров от переменных факторов, представлена на рис. 1.

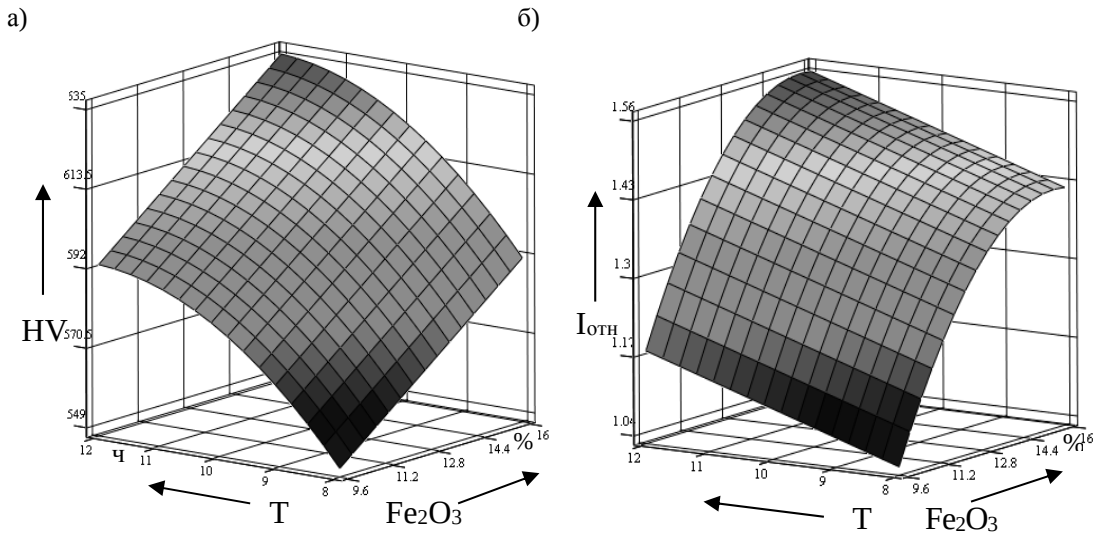


Рис. 1. Влияние содержания легирующей добавки и времени обработки композиций системы Fe–30 % Al–Fe_2O_3 на твердость (а) и износостойкость (б) плазменных покрытий

Таким образом, оптимальными условиями получения материалов системы Fe–30 % Al–Fe_2O_3, обеспечивающими формирование покрытия максимальной твердости и износостойкости в исследуемом интервале, являются время обработки 12 ч и количество легирующего соединения 15,7 %.

Влияние состава исходной шихты и времени ее обработки в механореакторе на твердость и износостойкость покрытий из материалов системы Fe–Cr–C.

Для материалов данной группы был реализован однофакторный эксперимент, описывающий влияние времени обработки композиций на твердость и относительную износостойкость получаемых покрытий.

Исследования проводились на трех композициях, химический состав которых соответствует сталям 40Х13, Х13, 95Х18. Композиции содержали 13 и 18 % хрома и 0,4, 1, 0,95 % углерода соответственно. Время обработки варьировалось в диапазоне 4…12 ч.

Для материалов данной группы наблюдается одинаковая зависимость изменения твердости покрытий, получаемых из синтезируемых материалов, от времени обработки шихты в механореакторе – увеличение времени механосинтеза ведет к росту твердости формируемого слоя (рис. 2, а).

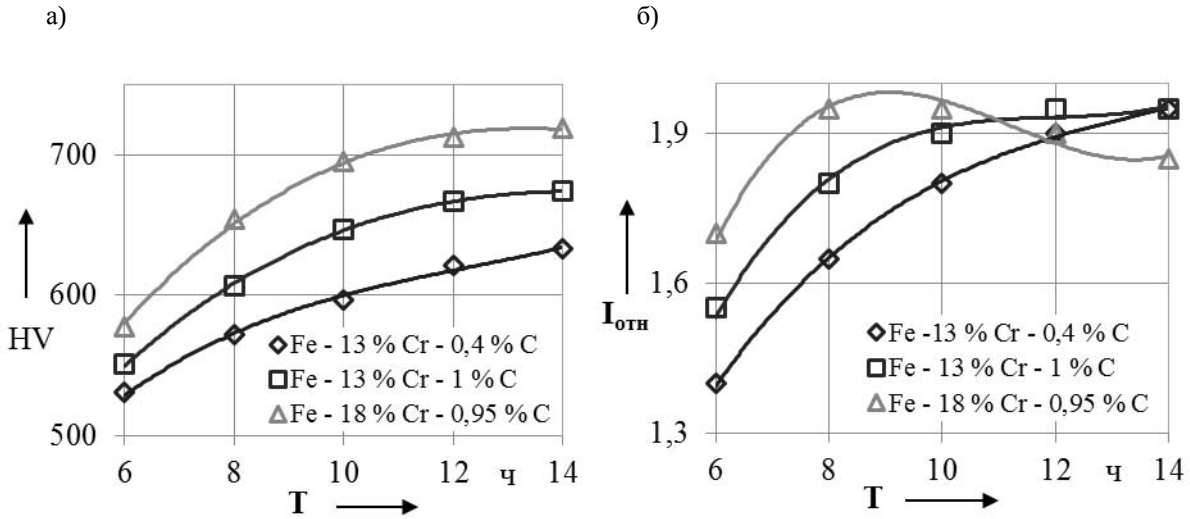


Рис. 2. Влияние времени обработки в механореакторе композиций системы Fe–Cr–C на твердость (а) и относительную износостойкость (б) плазменных покрытий

Снижение износостойкости покрытий состава Fe–18 % Cr–0,95 % C при увеличении времени обработки исходной композиции свыше 10 ч, вероятно, связано с ростом его хрупкости, обусловленным увеличением количества в его составе карбидов и оксидов.

Оптимизация состава исходной шихты и времени обработки в механореакторе композиций системы Fe–Ni–Cr–C–(Fe_2O_3 + Al) типа (12Х18Н10–Al_2O_3).

Базовым составом материалом данной системы является композиция состава Fe–18 % Cr–10 % Ni–0,12 % C. В качестве легирующей добавки дополнительно вводился оксид железа Fe_2O_3. Восстановителем служил алюминий, вводившийся в количестве 0,6…3,2 %. Соотношение между количеством вводимого оксида железа и алюминием стехиометрическое. Как и в случае с системой Fe–Al, введение оксида железа должно обеспечить дополнительное упрочнение, инициируемое образованием оксида алюминия Al_2O_3 в результате окисли-

тельно-восстановительной реакции.

Параметрами оптимизации являлись твердость покрытий и их износостойкость; переменными факторами – время обработки и содержание легирующей добавки Fe_2O_3.

По результатам статистической обработки экспериментальных данных получены математические модели, адекватно представляющие результаты экспериментов:

1) твердость газотермических покрытий

$$HV = 378 + 11x_1 + 19x_2 - 9x_1^2 - 10x_2^2 ; \quad (3)$$

2) относительная износостойкость

$$I_{отн} = 1{,}2531 + 0{,}1267x_1 + 0{,}1067x_2 - 0{,}094x_1^2 . \quad (4)$$

Графическая интерпретация моделей, показывающая зависимость исследуемых параметров от переменных факторов, представлена на рис. 3.

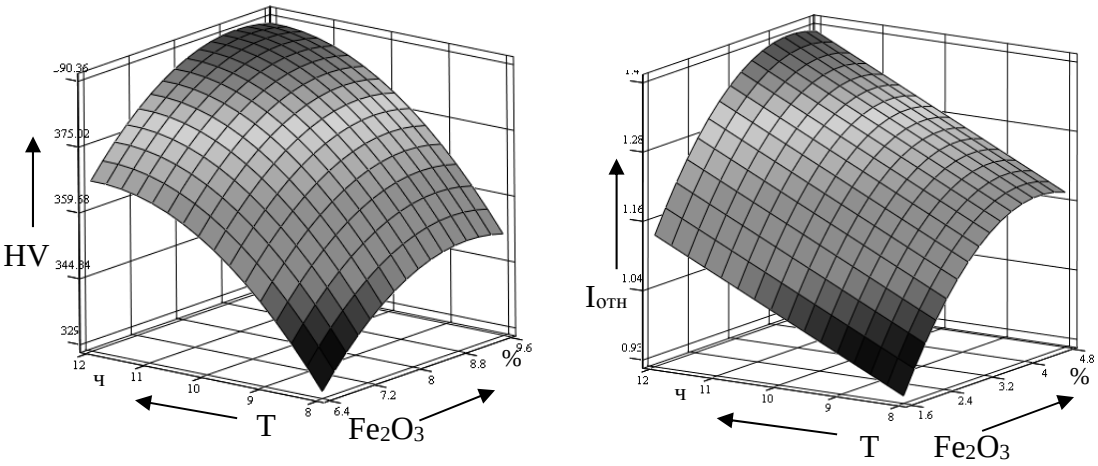


Рис. 3. Влияние содержания легирующей добавки и времени обработки композиций системы Fe–Ni–Cr–C–(Al–Fe_2O_3) на твердость (а) и относительную износостойкость (б) плазменных покрытий

Таким образом, исходя из полученных данных (рис. 3), можно заключить, что максимальная твердость покрытий достигается при обработке шихты в течение 12 ч, и содержании легирующего компонента 9,42 %. Максимальным значением относительной износостойкости покрытия обладают при аналогичном времени обработки и количестве легирующей добавки равном ≈ 4,4 %.

Оптимизация химического состава исходной шихты механически легированных композиций металлизированной керамики на основе системы Al_2O_3–TiO_2–Ni–Al.

Для данной системы параметрами оптимизации являлись вязкость покрытий и их износостойкость, переменными факторами – содержание легирующих добавок никеля и алюминия, количество которых варьировалось от 2,5 до 12,5 % и от 1,25 до 6,25 % соответственно. Время механосинтеза составляло 8 ч.

Установлено, что зависимости вязкости и износостойкости исследуемых покрытий от количества легирующих добавок в напыляемом материале описываются кривыми с максимумом. Это, вероятно, обусловлено изменением фазового состава металлической составляющей – максимальная износостойкость покрытий совпадает с соотношением металлических компонентов в шихте, соответствующем образованию интерметаллида NiAl.

По результатам статистической обработки экспериментальных данных получены математические модели, адекватно представляющие результаты экспериментов:

1) относительная вязкость газотермических покрытий

$$\mu_{отн} = 1{,}52 - 0{,}118x_{12} - 0{,}117x_1^2; \quad (5)$$

2) относительная износостойкость

$$I_{отн.} = 1{,}750 + 0{,}108x_1 + 0{,}057x_2 - 0{,}065x_{12} - 0{,}139x_1^2 - 0{,}124x_2^2 . \quad (6)$$

Графические интерпретации моделей, показывающих зависимость изменения исследуемых параметров от переменных факторов, представлена на рис. 4.

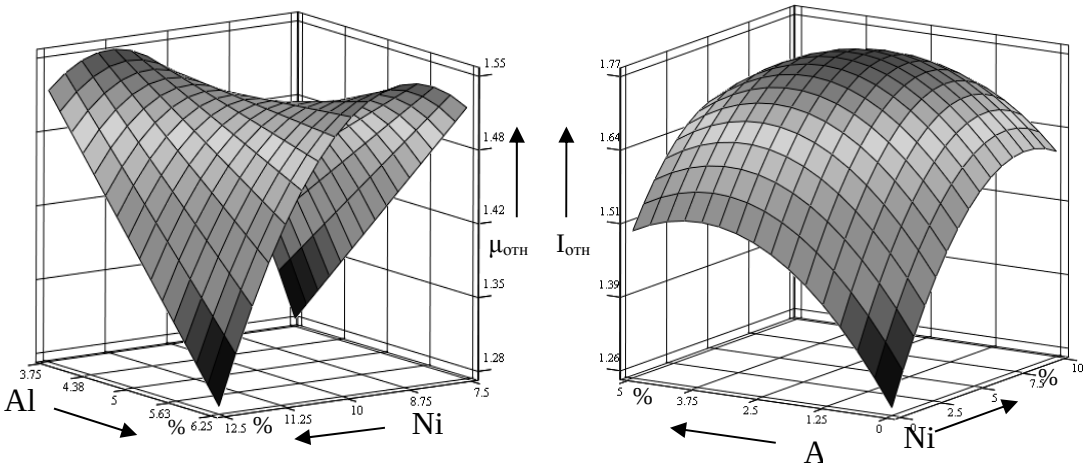


Рис. 4. Зависимость вязкости (а) и относительной износостойкости (б) покрытий из композиций системы Al_2O_3–13 % TiO_2–Ni–Al от количества никеля и алюминия в исходной шихте

Как видно из графика (рис. 4, а), наибольшей вязкостью покрытия обладают в случае максимального количества одного из легирующих компонентов при одновременном наименьшем количестве второго. Вероятно, это связано с тем, что такое соотношение обеспечивает присутствие в покрытии повышенного количества одного из легирующих металлов в исходном виде и минимальное количество интерметаллидов, обладающих высокой твердостью и повышенной хрупкостью. Напротив, максимальную износостойкость имеют покрытия, количество легирующих компонентов в которых приближено к стехиометрическому соотношению, необходимому для синтеза интерметаллида NiAl, отличающегося высокой твердостью (рис. 4, б).

Влияние параметров процесса плазменного напыления на плотность формируемых покрытий

В качестве технологических параметров процесса напыления, оказывающих наибольшее влияние на плотность формируемого слоя, были выбраны размер частиц порошка, диаметр отверстия подающей трубки, рабочая мощность плазмотрона, дистанция напыления.

Оптимизация осуществлялась методом однофакторного эксперимента.

Как показали предварительные исследования [3], допустимая пористость покрытий, по возможности, не должна превышать 5 %. В этом случае наличие пор не оказывает значительного влияния на изменение износо-

стойкости покрытий. Исходя из этого, при проведении оптимизации процесса напыления было принято, что условия формирования слоя должны обеспечивать плотность не ниже 95 %.

Влияние размера частиц на плотность покрытий.

Диаметр частиц является важной характеристикой напыляемого материала, оказывающей влияние на степень его расплавления в высокотемпературной струе, а следовательно, и на плотность формируемого слоя.

Для определения оптимального размера частиц, обеспечивающего формирование покрытия наибольшей плотности, исследуемые материалы условно классифицировались на три фракции (табл. 2). Из исследуемых композиций разделению не подвергались лишь композиции 4 и 5, 96 % частиц которых имеют размер, не превышающий 63 мкм.

В результате проведенных исследований были получены зависимости, позволившие определить предпочтительный размер частиц каждой из исследуемых композиций (рис. 5).

Табл. 2. Фракции порошковых материалов и средний размер частиц в них

Основная фракция порошкового материала, мкм	25…45	45…125	100…170
Средний размер частиц во фракции, мкм	35	85	135

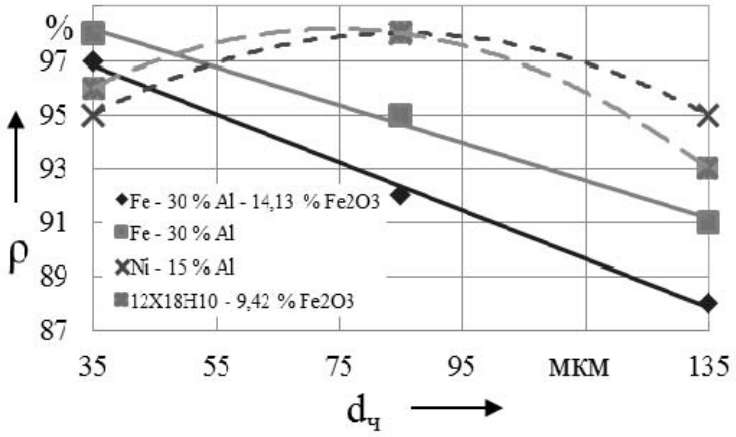


Рис. 5. Влияние размера частиц напыляемого порошкового материала на плотность плазменных покрытий

Согласно полученным данным, для большинства исследуемых композиций оптимальный размер частиц наносимого материала составляет 45…125 мкм. Исключением являются материалы на основе системы Fe–Al, для которых средний размер частиц не должен превышать 55 мкм.

Влияние диаметра отверстия подающей трубки на плотность покрытий.

Диаметр выходного отверстия подающей трубки варьировался в интервале 1,5…2,3 мм. В ходе исследований были получены следующие зависимости (рис. 6).

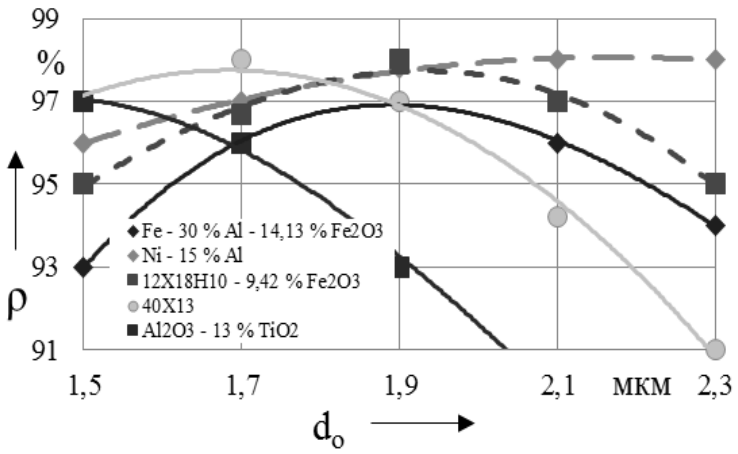


Рис. 6. Изменение плотности формируемого покрытия в зависимости от диаметра отверстия подающей трубки

Наиболее существенное влияние на плотность формируемых покрытий на основе металлов диаметр отверстия подающей трубки оказывает при напылении материала 40Х13. Для него превышение данного размера более 1,8 мм приводит к росту пористости формируемого слоя.

При напылении прочих композиций диаметр не оказывает столь существенного влияния на плотность. Его увеличение свыше 2 мм вызывает некоторое снижение плотности, что объясняется процессом захолаживания высокотемпературной струи, связанным с повышением расхода материала и транспортирующего газа.

Поскольку с уменьшением диаметра отверстия производительность процесса напыления и его КПД снижаются, а увеличение его значения более 2 мм приводит к росту пористости, для подачи большинства материалов оптимальным размером отверстия подающей трубки следует считать 2 мм. Для напыления порошковых композиций на основе системы Fe–Cr–C, следует принять размер 1,8 мм, а для материалов на основе оксидной керамики – 1,7 мм.

Влияние мощности плазменного потока на плотность формируемых покрытий.

Известно [4], что повышение температуры плазменного потока позволяет сократить время, необходимое для полного расплавления напыляемой частицы, или при условии сохранения дистанции напыления увеличить степень ее расплавления или пластификации. При этом увеличение температуры струи обеспечивается в большинстве случаев повышением мощности, потребляемой плазмотроном.

При проведении эксперимента рабочая мощность плазмотрона изменялась в интервале 30…50 кВт.

Из полученных зависимостей видно (рис. 7), что увеличение мощности, потребляемой плазмотроном, приводит к повышению плотности формируемых покрытий. В то же время при выборе ее оптимального значения необходимо принимать во внимание тот факт, что с увеличением тепловложения в частицу происходит ее перегрев и более интенсивное окисление. Увеличивается интенсивность нагрева подложки.

Исходя из вышеизложенного, рабочую мощность следует выбирать из условия минимально достаточного

значения, обеспечивающего получение покрытий с заданной плотностью (не ниже 95 %).

Влияние дистанции напыления на плотность формируемых покрытий.

При установлении оптимальной дистанции напыления руководствовались тем, что она должна обеспечивать требуемую плотность покрытия и не вызывать чрезмерного перегрева напыляемой поверхности. В ходе исследований расстояние от среза сопла плазмотрона до напыляемой поверхности изменялось в интервале 50…350 мм (рис. 8).

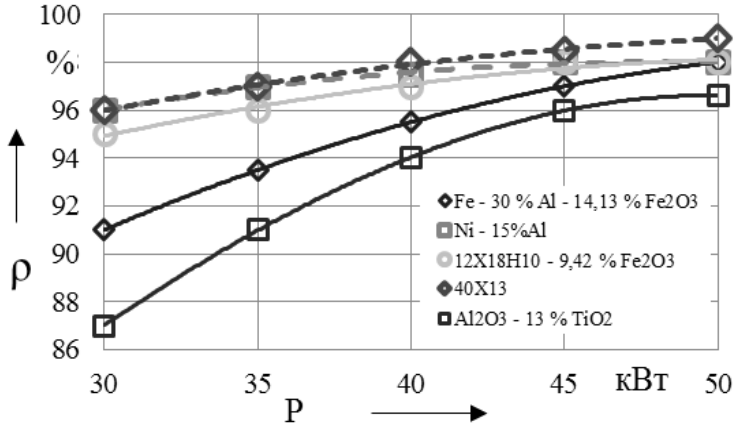


Рис. 7. Изменение плотности плазменных покрытий в зависимости от мощности потребляемой плазмотроном

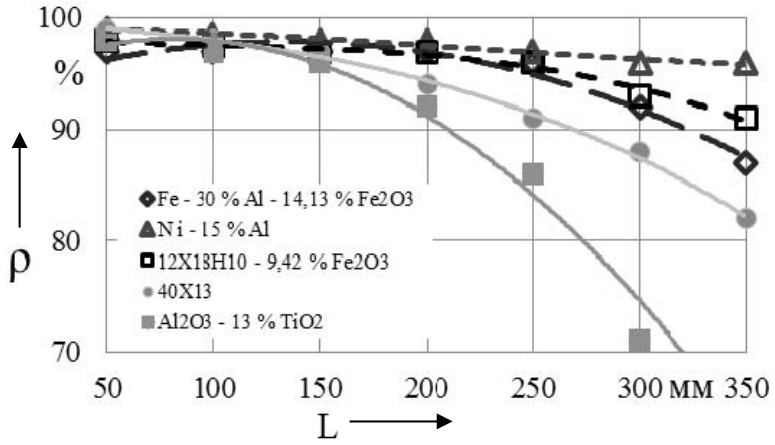


Рис. 8. Изменение плотности плазменных покрытий в зависимости от дистанции напыления

Как видно из рис. 8, для всех исследуемых композиций увеличение дистанции напыления в той или иной степени приводит к снижению плотности покрытий, формируемых из них. Наиболее заметное падение наблюдается при напылении композиционных материалов на основе систем Fe–Cr–C (40X13) и Al_2O_3–TiO_2. Для композиций системы Fe–Cr–C расстояние от среза сопла до напыляемого изделия не должно превышать 180 мм. Для керамических композиций с учетом их физических свойств следует выбирать минимальную дистанцию напыления, значение которой не должно превышать

100…120 мм. Остальные материалы целесообразно напылять при дистанции 200…250 мм от среза сопла до изделия, что, с одной стороны, обеспечит высокую плотность покрытий, а с другой – минимизирует тепловложение в напыляемое изделие от высокотемпературной струи.

Согласно полученным результатам, наибольшее влияние на плотность покрытий из большинства композиций на основе металлов оказывают мощность плазменной струи и размер гранул напыляемого материала, для гранулированных композиций на основе системы Fe–Cr–C – мощность плазменной струи и дистанция напыления. Плотность покрытий на основе оксидной керамики наиболее значимо зависит от диаметра подающей трубки и мощности плазменного потока.

Для определения оптимальных режимов напыления разработанных порошковых материалов, обеспечивающих получение покрытий максимальной плотности, были проведены исследования по установлению совместного влияния выбранных факторов.

Оптимизация параметров процесса напыления покрытий

С целью определения оптимальных режимов напыления покрытий, обеспечивающих получение максимально плотного слоя, реализовывался полнофакторный эксперимент с применением центрального композиционного ортогонального плана второго порядка.

Оптимизация процесса напыления порошковых материалов на основе системы Fe–Cr–C.

Исследование проводили на материале состава Fe–13 % Cr–0,4 % C (40Х13).

В качестве переменных факторов, оказывающих наиболее существенное и явное влияние на плотность формируемого покрытий, была выбрана дистанция напыления и мощность плазменного потока. Средний размер гранул наносимого материала составлял 35 мкм. Рабочая мощность установки изменялась в пределах 30…40 кВт. Дистанция напыления варьировалась в интервале 100…180 мм.

В результате статистической обработки экспериментальных данных получена математическая модель, адекватно представляющая результаты исследований:

$$\rho = 97 - 4x_1 + 2{,}7x_2 - 4{,}6x_1^2 . \qquad (7)$$

Как видно из представленного графика (рис. 9), повышение мощности струи приводит к росту плотности формируемого слоя, а увеличение дистанции напыления к ее снижению. Таким образом, для материалов данной группы оптимальными условиями напыления является мощность высокотемпературного потока 40 кВт и дистанция напыления 115 мм.

Оптимизация процесса напыления порошковых материалов на основе системы Fe–Ni–Cr–C–(Al + Fe_2O_3).

Для оптимизации процесса был выбран материал состава Fe–18 % Cr–10 % Ni–0,12 % C + (6,28 % Fe_2O_3 + Al). В качестве переменных факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на плотность формируемого покрытия, были выбраны средний размер гранул наносимого материала и мощность плазменного потока. В эксперименте размер частиц составлял 35…135 мкм, рабочая мощность установки изменялась в интервале 30…50 кВт.

В результате статистической обработки экспериментальных данных получена математическая модель, адекватно представляющая результаты эксперимента:

$$y = 94 - 3{,}8x_1 + 3{,}8x_2 - 5{,}2x_1^2 . \qquad (8)$$

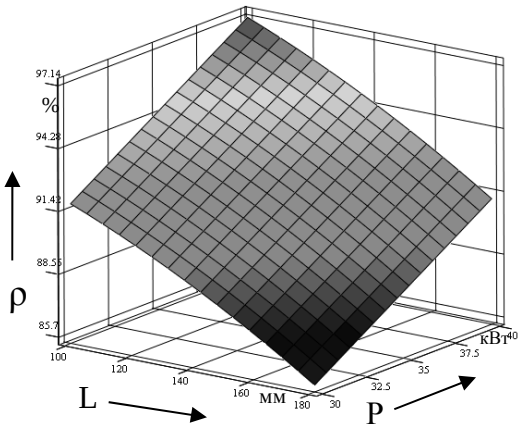


Рис. 9. Зависимость плотности формируемых покрытий из порошкового материала Fe–13 % Cr–0,4 % C от дистанции напыления и мощности плазменной струи

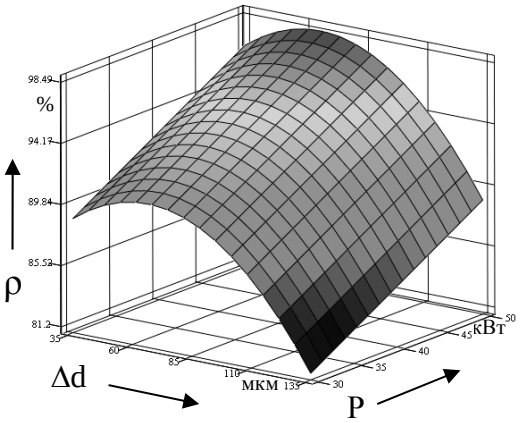


Рис. 10. Зависимость плотности формируемых покрытий из композиционного материала Fe–18 % Cr–10 % Ni–0,12 % C + (6,28 % Fe_2O_3 + Al) от среднего размера частиц и мощности плазменной струи

Наибольшей плотностью покрытия обладают в случае использования гранулированной композиции с размером частиц 75 мкм (рис. 10). Увеличение мощности плазменного потока ведет к повышению плотности покрытия. Таким образом, для данной группы материалов за оптимальные условия напыления можно принять мощность плазменной струи 45 кВт, средний размер гранул 85 мкм.

Оптимизация процесса напыления порошковой композиции Fe–30 % Al–Fe_2O_3.

Для оптимизации использовали порошок, полученный из шихты Fe–30 % Al–(7,85 % Fe_2O_3–Al). В качестве переменных факторов, оказывающих наиболее существенное и явное влияние на плотность формируемого покрытий, были выбраны размер частиц наносимого материала и мощность плазменного потока. В эксперименте средний размер частиц составлял 35…135 мкм, потребляемая плазмотроном мощность изменялась в интервале 30…50 кВт.

В результате статистической обработки экспериментальных данных получена математическая модель, адекватно представляющая результаты эксперимента:

$$y = 87 - 9{,}3x_1 + 5{,}3x_2 - 4{,}7x_1^2 \quad . (9)$$

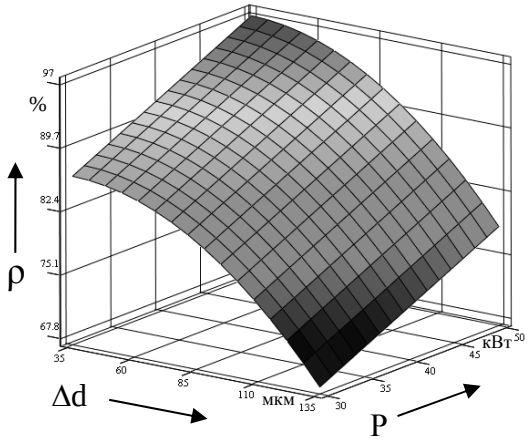


Рис. 11. Зависимость плотности формируемых покрытий из порошкового материала Fe–30 % Al–7,85 % Fe_2O_3 от среднего размера частиц и мощности потребляемой плазмотроном

Исходя из полученных данных (рис. 11), для рассматриваемой группы материалов оптимальными условиями напыления будут мощность плазменной струи ≈ 45 кВт, средний размер частиц 35 мкм.

Оптимизация процесса напыления композиционных материалов на основе системы Al_2O_3–TiO_2.

Для оптимизации использовали механически легированный материал состава Al_2O_3–13 % TiO_2. В качестве переменных факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на плотность формируемых покрытий, были выбраны диаметр отверстия подающей трубки и мощность потребляемая плазмотроном. В эксперименте диаметр отверстия подающей трубки варьировался в интервале 1,4…2 мм, рабочая мощность установки изменялась от 35 до 45 кВт.

В результате статистической обработки экспериментальных данных получена математическая модель, адекватно представляющая результаты эксперимента:

$$y = 87 - 9{,}3x_1 + 5{,}3x_2 - 4{,}7x_1^2 . \quad (10)$$

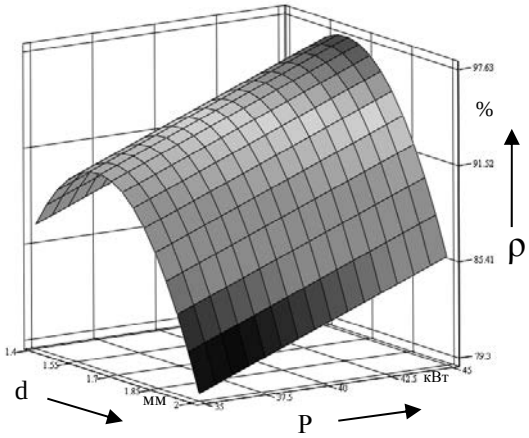


Рис. 12. Зависимость плотности формируемых покрытий из композиционного материала Al_2O_3–13 % TiO_2 от диаметра отверстия подающей трубки и мощности потребляемой плазмотроном

Исходя из полученных данных (рис. 12), для рассматриваемой группы материалов оптимальными условиями напыления будут мощность плазменной струи 40 кВт, диаметр подающей трубки 1,7 мм.

Таким образом, оптимальными условиями напыления разработанных порошковых материалов будут размер отверстия подающей трубки для большинства гранулированных композиций на основе металлов 2 мм, для композиций на основе систем Fe–Cr–C и Al_2O_3–TiO_2 – 1,8 и 1,7 мм соответственно. Дистанция напыления для материалов на основе металлов составляет 200…250 мм от среза сопла до изделия, для композиций Fe–Cr–C и Al_2O_3–TiO_2 – 100…120 мм. Мощность плазменной струи – не менее 40 кВт. Средний размер гранул напыляемого материала для большинства металлических композиций – 85 мкм, для материалов систем Fe–Cr–C, Fe–30 % Al и Al_2O_3–TiO_2 – 35 мкм.

Выводы

1. Установлено, что увеличение времени обработки шихты исследованных композиций в механореакторе при оптимальных технологических параметрах механического легирования в интервале 6…12 ч приводит к росту твердости и износостойкости покрытий, формируемых из полученных в результате механического легирования порошков, что обусловлено более полным завершением механохимических превращений в материале, образованием большего количества дисперсных упрочняющих фаз, а также измельчением структуры материала.

2. Определены оптимальные составы исходных композиций, обеспечивающие получение плазменных покрытий с наибольшим значением износостойкости, которые составили:

– материалы на основе железа:

Fe–30 % Al–15,7 % Fe_2O_3;

Fe–18 % Cr–0,95 % C;

Fe–18 % Cr–10 % Ni – (9,42 % Fe_2O_3–Al);

– материалы на основе металлизированной керамики:

Al_2O_3–13% TiO_2–7,5 % Ni–3,75 % Al.

3. Исследовано влияние режимов напыления покрытий на их плотность и установлены оптимальные условия напыления разработанных композиционных порошковых материалов, которые имеют следующие параметры: размер отверстия подающей трубки для большинства синтезированных порошков на основе металлов 2 мм, для композиций на основе систем Fe–Cr–C и Al_2O_3–TiO_2 – 1,8 и 1,7 мм соответственно. Дистанция напыления для материалов на основе металлов составляет 200…250 мм от среза сопла до изделия, для композиций Fe–Cr–C и Al_2O_3–TiO_2 – 100…120 мм. Мощность плазменной струи – не менее 40 кВт. Средний размер гранул напыляемого материала для большинства металлических композиций – 85 мкм, для материалов систем Fe–Cr–C, Fe–30 % Al и Al_2O_3–TiO_2 – 35 мкм. Расстояние от среза сопла до выходного отверстия – 5 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ловшенко, Г. Ф.** Теоретические и технологические аспекты создания наноструктурных механически легированных материалов на основе металлов / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2005. – 276 с.

2. **Ловшенко, Г. Ф.** Наноструктурные механически легированные материалы на основе металлов : монография / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко Б. Б. Хина ; под ред. д-ра техн. наук, проф. Ф. Г. Ловшенко. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2008. – 679 с. : ил.

3. **Ловшенко, Ф. Г.** Исследование износостойкости газотермических покрытий / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, А. С. Федосенко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : мате-

риалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 24–25 апр. 2014 г. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; редкол. : И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2014. – С. 124–125.

4. **Борисов, Ю. С.** Плазменные порошковые покрытия / Ю. С. Борисов, А. Л. Борисова. – Киев : Техника, 1986. – 222 с.

Статья сдана в редакцию 30 июня 2016 года

Алексей Сергеевич Федосенко, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет. Тел. :+375-295-46-96-34.
Федор Григорьевич Ловшенко, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет
Григорий Федорович Ловшенко, д-р техн. наук, проф., ректор Белоруской государственной академии авиации.

Aleksei Sergeyevich Fedosenko, senior lecturer, Belarusian-Russian University. Phone: +375-295-46-96-34.
Fedor Grigoryevich Lovshenko, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.
Grigory Fedorovich Lovshenko, DSc (Engineering), Prof., Rector of Belarusian State Aviation Academy.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.31

С. В. Болотов, В. А. Игнатов, К. В. Овсянников

УСТАНОВКА ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ

UDC 621.31

S. V. Bolotov, V. A. Ignatov, K. V. Ovsyannikov

INSTALLATION FOR ELECTRIC AND THERMAL TESTING OF ARC WELDING POWER SOURCES

Аннотация

Разработана установка, позволяющая осуществлять регистрацию электрических и тепловых характеристик источников питания дуговой сварки в ходе сертификационных испытаний. Описаны состав установки и методика проведения испытаний. Приведена программная часть установки для построения вольт-амперных характеристик.

Ключевые слова:

источники питания, дуговая сварка, установка, сварочный ток, вольт-амперная характеристика, тепловые испытания, виртуальный прибор.

Abstract

The installation has been developed which performs the registration of electrical and thermal characteristics of arc welding power sources during certification tests. The installation and testing procedures are described. The software used by the installation for plotting current-voltage characteristics is given.

Key words:

power sources, arc welding, installation, welding current, current-voltage characteristic, thermal testing, virtual instrument.

Источники питания дуговой сварки подлежат подтверждению соответствия требованиям безопасности технического регламента Таможенного союза ТР ТС-004-2011 *О безопасности низковольтного оборудования* в форме сертификации. Требования к промышленным и профессиональным источникам сварочного тока, предназначенным для выполнения дуговой сварки и родственных процессов, установлены ГОСТ Р МЭК 60974-1-2012 [1].

В ходе испытаний производится оценка: защиты от поражения электрическим током, требований к теплоизоляции, тепловой защиты, подключения к сети электропитания, выхода, механических средств.

Центром сертификации и испытаний ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет» разработана установка, позволяющая осуществлять измерение и регистрацию электрических характеристик источников питания дуговой сварки, таких как напряжение питания U_1, потребляемая мощность P_1, ток питания I_1, напряжение холостого хода U_0, сварочный ток I_2, напряжение нагрузки U_2.

© Болотов С. В., Игнатов В. А., Овсянников К. В., 2016

Установка дает возможность проводить тепловые испытания с целью определения максимального нагрева обмоток и внешних поверхностей источников [2].

Структурная схема установки приведена на рис. 1.

Установка получает питание от сети трёхфазного переменного напряжения 380 В, 50 Гц. Для изменения питающего источник сварочного тока напряжения применяется лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) TSGC-30k с номинальной мощностью 30 кВ·А и диапазоном регулирования выходного трёхфазного напряжения 0…430 В. ЛАТР позволяет проводить испытания для заданного в паспорте источника питания сварочной дуги диапазона питающих напряжений.

Испытуемое оборудование для дуговой сварки подключается через щиток силовой с аппаратами коммутации и защиты. Фазные напряжения питания, мощность и токи контролируются трёхфазным счётчиком активной электрической энергии CE301BY S31 с классом точности 0,5s, диапазоном измерений напряжений 172,5…264,5 В, токов 0…100 А, частоты 45,5…50,5 В. Счётчик обеспечивает передачу информации об измеренных значениях на внешние устройства по интерфейсу RS-485. Для сопряжения счётчика и электронно-вычислительной машины, осуществляющей отображение информации, используется преобразователь интерфейса USB to RS-485 ADAM-4561.

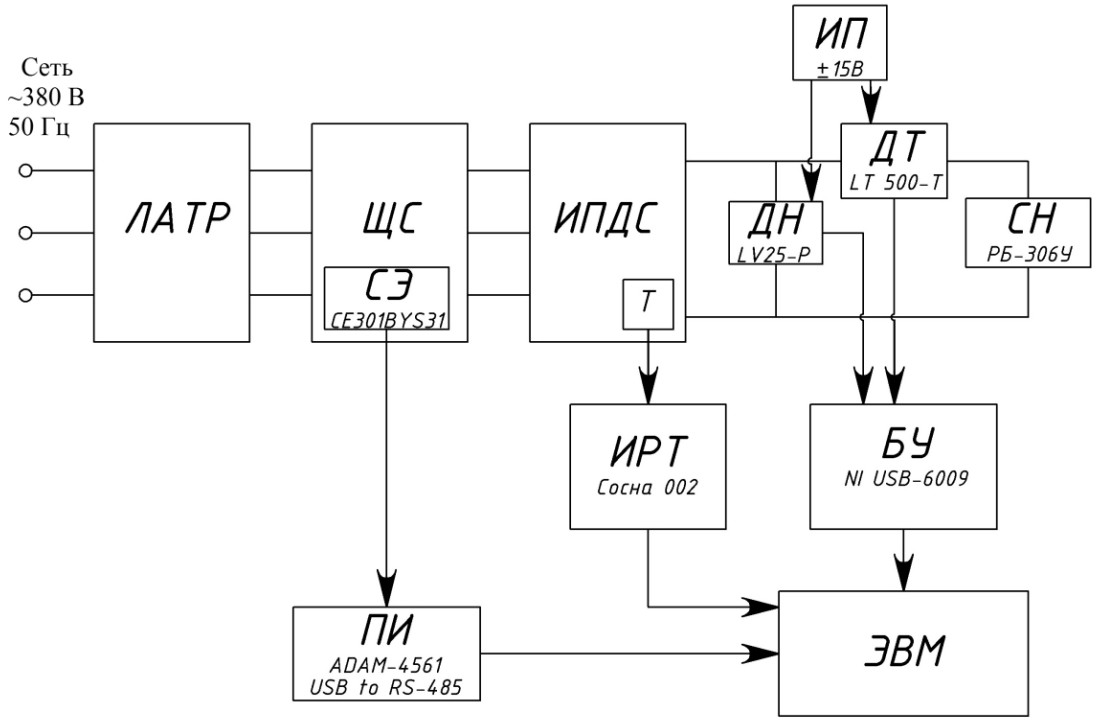


Рис. 1. Структурная схема установки: ЛАТР – лабораторный автотрансформатор; ЩС – щиток силовой; СЭ – счётчик электроэнергии; ИПДС – источник питания дуговой сварки; Т – термопара; ДН – датчик напряжения; ДТ – датчик тока; ИП – источник питания; СН – стандартная нагрузка; ИРТ – измеритель-регистратор температуры; БУ – блок управления; ПИ – преобразователь интерфейса; ЭВМ – электронно-вычислительная машина

Измерение мгновенных значений сварочного тока производится датчиком тока LT 500-T с диапазоном измерений от 0 до ±500 А и точностью преобразования ±0,3 %. Напряжение на дуге измеряется датчиком напряжения LV25-P с диапазоном измерений от 10 до 500 В и точностью преобразования ±0,8 %.

Датчики получают питание от стабилизированного источника ИП двухполярного напряжения ±15 В.

Передача регистрируемых мгновенных значений тока и напряжения через токовые выходы датчиков на ЭВМ осуществляется блоком управления с устройством сбора данных NI USB-6009 [3], имеющим восемь аналоговых входов ±10 В с разрешением 14 бит и частотой оцифровки 10 кГц на каждый задействованный канал.

Для измерения напряжения на выходе испытуемого источника и тока нагрузки может применяется вольтметр В7-58. При диапазоне измерений напряжения 0…+200 В погрешность составляет ±0,15 %, а при диапазоне измерения постоянного тока от 0 до +200 мА (выход датчика тока LT 500-T) погрешность не более ±1 %.

В качестве стандартной нагрузки для сварочного источника применяются балластные реостаты РБ-306 У2, позволяющие при параллельном включении ступенчато регулировать ток нагрузки в диапазоне 6…630 А.

Для проведения тепловых испытаний источников питания дуговой сварки используются термопары Т-преобразователи термоэлектрические ТХА(К)-1199, подключаемые к измерителю-регулятору температуры СОСНА-002. Диапазон измерения температуры от минус 40 до плюс 800 °С, погрешность измерения Δ = 1 %.

Внешний вид установки представлен на рис. 2.

Рис. 2. Внешний вид установки: 1 – ЩС; 2 – измеритель-регулятор температуры; 3 – термопара; 4 – стойка; 5 – вольтметр; 6 – стандартная нагрузка; 7 – датчик тока; 8 – амперметр; 9 – ЛАТР; 10 – блок управления; 11 – ЭВМ

Разработанная установка позволяет на основе измеренных значений величин сварочного тока и соответствующего напряжения нагрузки осуществлять построение статических вольт-амперных характеристик (ВАХ) сварочного источника питания.

ВАХ источника питания представляет собой семейство характеристик U = f(I), построенных для различных положений регулятора сварочного напряжения (тока) при изменении нагрузки на балластном реостате.

Программная часть установки реализована в среде графического программирования NI LabVIEW [4]. Программа представляет собой виртуальный прибор, блок-диаграмма которого приведена на рис. 3.

Сбор данных осуществляется блоком DAQ Assistant, после чего блок Amplitude and Level Measurements выделяет постоянную составляющую сварочного тока и напряжения. Отображение результатов измерений производится с помощью цифровых и аналоговых индикаторов. Для построения ВАХ используется блок Build XY Graph.

На рис. 4 представлена панель виртуального прибора (диалоговое окно) программы для построения вольт-амперной характеристики источника питания дуговой сварки. С помощью аналоговых и цифровых индикаторов осуществляется отображение текущего значения сварочного тока и напряжения на дуге. Вольт-амперная характеристика строится при изменении тока от нуля (холостой ход) до максимального значения. Рабочая точка (номинальный режим работы) определяется при пересечении ВАХ источника с характеристикой нагрузки.

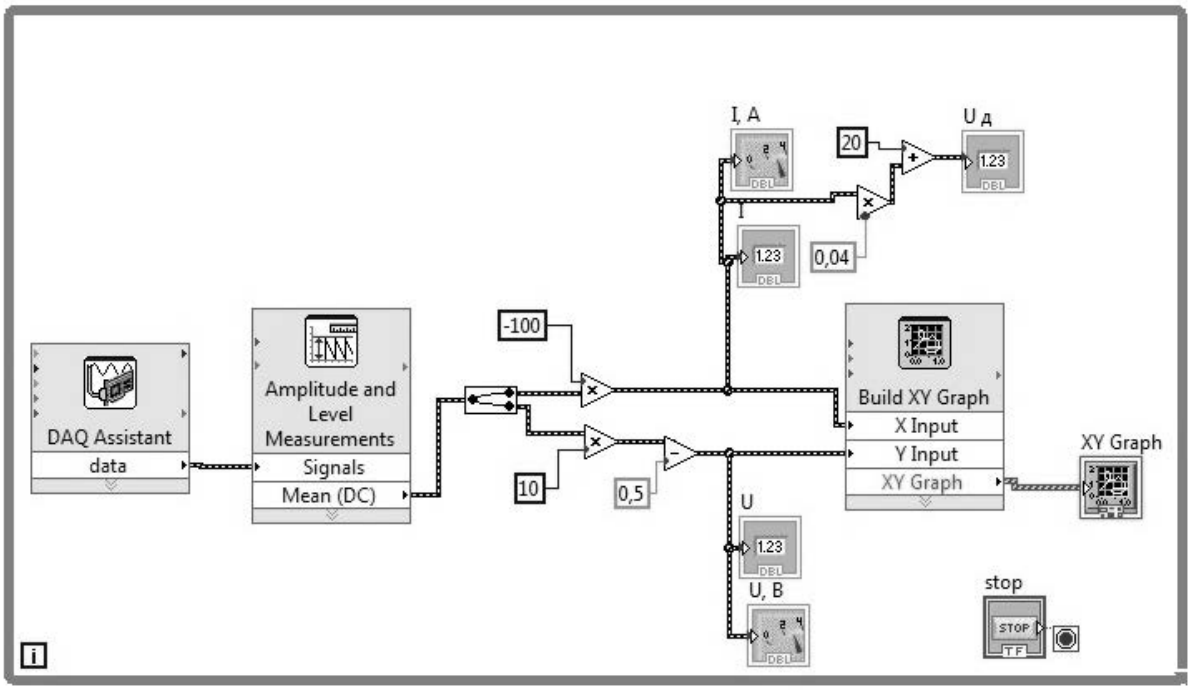


Рис. 3. Блок-диаграмма программы построения ВАХ

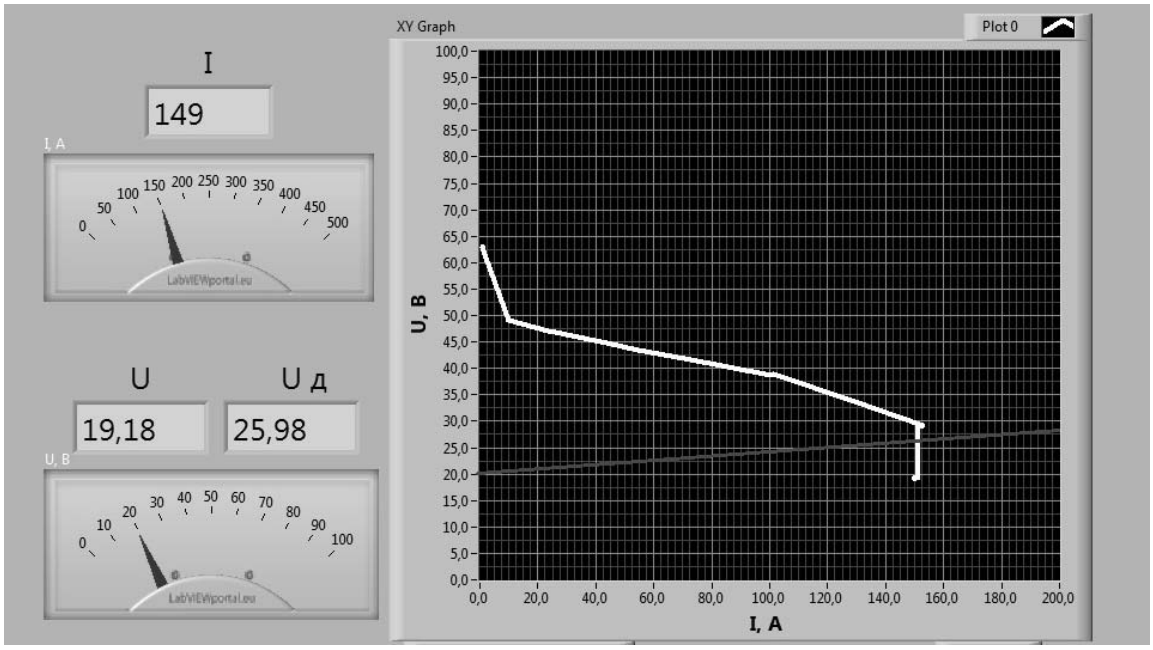


Рис. 4. Виртуальный прибор для снятия ВАХ источника питания

Например, для ручной дуговой сварки характеристика нагрузки имеет вид:

$$U = 20 + 0{,}04I.$$

Для измерения температуры окружающего воздуха три термоэлектрических преобразователя располагают вокруг источника питания для дуговой сварки на стойках примерно на половине высоты источника и на расстоянии 1…2 м от его поверхности. Устройства защищают от сквозняков и перегрева. Температура окружающего воздуха принимается равной среднему значению показателей трёх термопар.

Для измерения температуры обмоток и внешних поверхностей три термоэлектрических преобразователя располагают в точках контроля, где возможна максимальная температура. Рекомендуется определять предсказуемые горячие точки с помощью предварительной проверки.

Сварочный источник питания испытывается при номинальном значении напряжения питания на постоянном токе, при времени цикла (10,0 ± 0,2) мин:

– с номинальным сварочным током при нужном рабочем цикле 60 и (или) 100 %;

– с максимальным сварочным током при соответствующем рабочем цикле.

Тепловые испытания проводятся до тех пор, пока величина температурного скачка на испытуемом элементе не будет превышать 2 К/ч за период не менее 60 мин. В течение последних 60 мин тепловых испытаний должны соблюдаться следующие допуски: напряжение нагрузки – от +10 до –2 %, сварочный ток – от +10 до –2 %; напряжение питания – ±5 %, температура – от +10 до –2 К относительно температуры окружающей среды.

Пределы превышения температуры обмоток над температурой окружающей среды не должны быть больше значений, приведенных в табл. 1. Если испытание на нагрев производится при температуре, отличной от 40 °С, то значение измеренной температуры должно быть откорректировано путём добавления разности между значением 40 °С и температурой окружающего воздуха.

Превышение температуры в отношении внешних поверхностей не должно быть больше значений, представленных в табл. 2.

Табл. 1. Пределы превышения температуры для обмоток

Класс изоляции	Максимальная температура, °С	Предел превышения температуры, °С
A (105)	140	55
E (120)	155	70
B (130)	165	75
F (155)	190	95
H (180)	220	115
N (200)	235	130
R (220)	250	150

Табл. 2. Пределы превышения температуры для наружных поверхностей

Класс изоляции	Предел превышения температуры, °С	Предельное значение продолжительности контакта, с
Металлические корпуса без покрытия	25	1
Металлические корпуса с лакокрасочным покрытием	35	1
Пластмассовые корпуса	45	1
Металлические кнопки без покрытия	18	4
Металлические кнопки с лакокрасочным покрытием	22	4
Пластмассовые кнопки	35	4
Металлические ручки	10	60
Пластмассовые ручки	20	60

Разработанная установка используется при проведении сертификационных испытаний источников питания для дуговой сварки и аттестована в Могилевском центре стандартизации и метрологии.

Установка может применяться для проверки соответствия технических характеристик сварочного оборудования требованиям паспортов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ Р МЭК 60974-1-2012.** Оборудование для дуговой сварки. Ч. 1 : Источники сварочного тока. – М. : Стандартинформ, 2014. – 85 с.

2. **Болотов, С. В.** Установка для испытаний источников питания дуговой сварки / С. В. Болотов, А. М. Белягов // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев, 2014. – С. 178–179.

3. Руководство пользователя и технические характеристики USB-6008/6009 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http : // www.labview.ru/products/docs/NI%20USB%206008.pdf. – Дата доступа : 20.05.2016.

4. **Евдокимов, Ю. К.** LabVIEW для радиоинженера: от виртуальной модели до реального прибора. Практическое руководство для работы в программной среде LabVIEW / Ю. К. Евдокимов, В. Р. Линдваль, Г. И. Щербаков. – М. : ДМК Пресс, 2007. – 400 с.

Статья сдана в редакцию 11 июня 2016 года

Сергей Владимирович Болотов, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-296-99-31-56.
Валентин Александрович Игнатов, магистрант, Белорусско-Российский университет.
Константин Валерьевич Овсянников, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.

Sergey Vladimirovich Bolotov, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-296-99-31-56.
Valentin Aleksandrovich Ignatov, MSc student, Belarusian-Russian University.
Konstantin Valeryevich Ovsyannikov, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.

УДК 623.3, 656.02

Ф. М. Трухачёв, А. И. Гуторов, С. В. Болотов

ИНФОРМАЦИОННО-РЕКЛАМНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА «ЭЛЕКТРОННЫЙ ГИД»

UDC 623.3, 656.02

F. M. Trukhachev, A. I. Gutorov, S. V. Bolotov

«ELECTRONIC GUIDE» INFORMATION AND ADVERTISING SYSTEM FOR PUBLIC TRANSPORT

Аннотация

Разработана программно-аппаратная система «Электронный гид» для общественного транспорта: совокупность информационно-рекламных мониторов, устанавливаемых в салоны автобусов, троллейбусов, которые управляются с центрального сервера. Мониторы в автоматическом режиме передают видеоакустическую информацию о маршруте (текущее местоположение и ближайшие остановки), георекламу, прогноз погоды, курсы валют. Сервер анализирует информацию о пробках, что полезно для служб города.

Ключевые слова:

электронный гид, общественный транспорт, информационный экран, центральный сервер, программное обеспечение, GPS.

Abstract

The «Electronic Guide» hardware and software system has been developed for public transport which is a set of information and advertising displays installed in the passenger compartments of buses (trolleybuses, etc.), monitored from the central server. The monitors automatically transmit video acoustic information about the route (current location and the next stops), georeklama, weather forecast, exchange rates, etc. The server analyzes the traffic congestion information, which is useful for city services.

Key words:

information technology, public transport, advertising, georeklama, software, GPS navigation,

Введение

Концепция «умный город» включает в себя ряд составляющих, таких как энергоэффективность, эффективная транспортная инфраструктура, эффективность коммунальных и инженерных систем, привлекательность для туристов и инвесторов, удобство для жителей города. Также актуальной является задача обеспечения общественной безопасности. Полная имплементация концепции – дорогостоящая задача, которую в состоянии решить мегаполисы стран с развитой наукой, информационными технологиями и др.

Остановимся на решении задачи создания «умного» общественного транспорта. Общественный транспорт (далее ОТ) – ключевой элемент инфраструктуры современных мегаполисов, основная задача которого – перевозка пассажиров. Однако, применяя современные технологии, представляется возможным раскрыть информационный потенциал ОТ, тем самым существенно повысить эффективность и удобство его использования.

Процесс передачи информации об остановочных пунктах автоматизирован в недостаточной степени и требует уча-

© Трухачёв Ф. М., Гуторов А. И., Болотов С. В., 2016

стия водителя. Кроме того, пассажиры получают информацию только о текущей и следующей точках маршрута. Создание системы автоматического определения остановочных пунктов с использованием технологий GPS, GLONAS значительно облегчит работу водителя.

ОТ пользуются туристы, разработка и внедрение современных информационных технологий для транспорта позволит развить инфраструктуру туризма, повысить степень информатизации в городе.

Жители городов, которые могут получать в режиме real-time информацию о местоположении объектов общественного транспорта через сеть Интернет, будут лучше планировать маршрут и рационально использовать рабочее время, что отразится на производительности труда.

ОТ предполагается использовать в качестве источника информации о состоянии транспортной ситуации в городе, а также в качестве системы передвижных камер видеонаблюдения, информацию с которых можно получить в реальном времени. Повышение общественной безопасности – важная задача, актуальность которой в последнее время возрастает.

Актуальным также является создание новой рекламной площадки с потенциально широкой аудиторией с большими возможностями контроля рекламного контента (привязка рекламы ко времени и к местоположению).

Проблема информирования пассажиров общественного транспорта решена к настоящему времени несколькими способами.

1. Объявление водителем остановочных пунктов по громкой связи. Данный способ на сегодняшний день не используется, поскольку не может обеспечить высокое качество передачи информации, кроме того, в значительной мере отвлекает внимание водителя.

2. Цифровое воспроизведение информации о маршруте с кнопочным управлением. Этот способ является логическим продолжением предыдущего, обеспечивает высокую разборчивость речевой информации, а также облегчает работу водителя. Тем не менее система требует ручного управления.

3. Вывод текстовой информации на информационные табло с кнопочным управлением. Данный метод позволяет выводить информацию в текстовом виде, что актуально для слабослышащих пассажиров и в целом повышает качество использования ОТ, в особенности в зимний период и в темное время суток. Система предполагает ручное или автоматическое управление. В частности, в поездах компании «Стадлер» (Stadler), курсирующих в г. Минске и Минской области, установлены информационные экраны с автоматическим управлением [1].

Все вышеописанные способы информирования пассажиров общественного транспорта обладают рядом недостатков, главными из которых являются:

– низкая информационная насыщенность;

– участие водителя в управлении системой;

– передача информации на одном языке.

Система «Электронный гид»

Рассмотрим новую автоматизированную информационную систему «Электронный гид» для общественного транспорта с расширенными возможностями, в которой лежат технологии GPS, GLONAS. Ее элементы функционируют под управлением операционных систем Android и Windows. Разработанная система может работать как источник данных о положении транспортных средств для диспетчеров автопарков [2], поскольку использует элементы с GPS- и 3G-модулями.

Информационно-рекламная система

«Электронный гид» представляет собой совокупность информационных экранов в транспортных средствах, управляющих устройств с модулями GPS и 3G, установленных в кабине водителя, а также сервера, содержащего СУБД и средства администрации системы.

Информационный экран – ударопрочный жидкокристаллический дисплей размером 20…30 дюймов, стационарно устанавливаемый в салоне автобуса (троллейбуса и т. д.), предназначенный для отображения визуальной информации о маршруте и другой информации.

Управляющее устройство – блок под управлением ОС Android (Linux), который на основе GPS-данных выдает на информационный экран необходимую информацию. Управляющее устройство может передавать информацию о местоположении и скорости транспортного средства на головной сервер оператора транспортных средств (автобусный парк и др.) посредством 3G-канала связи. Управляющее устройство может работать в режиме offline при отсутствии 3G-канала связи.

Центральный сервер – сервер, обрабатывающий информацию о местоположении транспортных средств и представляющий ее авторизованным клиентам. Он также содержит средства управления базой данных, заключающей в себе всю информацию о маршрутах, которая может быть отображена на информационных экранах. Клиентами могут быть любые устройства (мобильные или стационарные), подключенные к сети Интернет. Правила доступа к информации на сервере устанавливает администратор сервера.

Структурная схема системы, описывающая взаимосвязь ее отдельных элементов, представлена на рис. 1.

Программное обеспечение для управляющих устройств написано на языке Java [3, 4]. В процессе создания системы автоматического управления были учтены погрешности определения координат в рамках технологии GPS и использованы стандартные библиотеки для работы GPS-модуля. В ходе эксперимента определены пространственные области в окрестности остановочных пунктов, нахождение в которых соответствует событиям «Прибытие на остановочный пункт», «Начало движения к следующему остановочному пункту».

Программное обеспечение для центрального сервера написано на языке PHP [5, 6] с использованием технологий Google Map.

Стандартные протоколы обмена данными TCP/IP и FTP.

Разработанное программное обеспечение, устанавливаемое на управляющее устройство, обрабатывает данные о местоположении транспортного средства, получаемые со встроенного модуля GPS, на основе которых управляющее устройство посылает команды управления для информационного экрана, размещенного в салоне автобуса (троллейбуса). На экране отображается информация о маршруте, сохраненная предварительно в базе данных. Координаты остановок были определены с помощью сервиса Google Map. Основными событиями, которые обрабатывают разработанные приложения, являются «Прибытие к остановочному пункту А» (событие 1), «Отправление к следующему остановочному пункту» (событие 2). Обработка указанных событий выполнена согласно рис. 2.

Если координаты транспортного средства соответствуют зоне события 1, то головное устройство выполняет команду «Остановочный пункт А», что отображается на информационном экране.

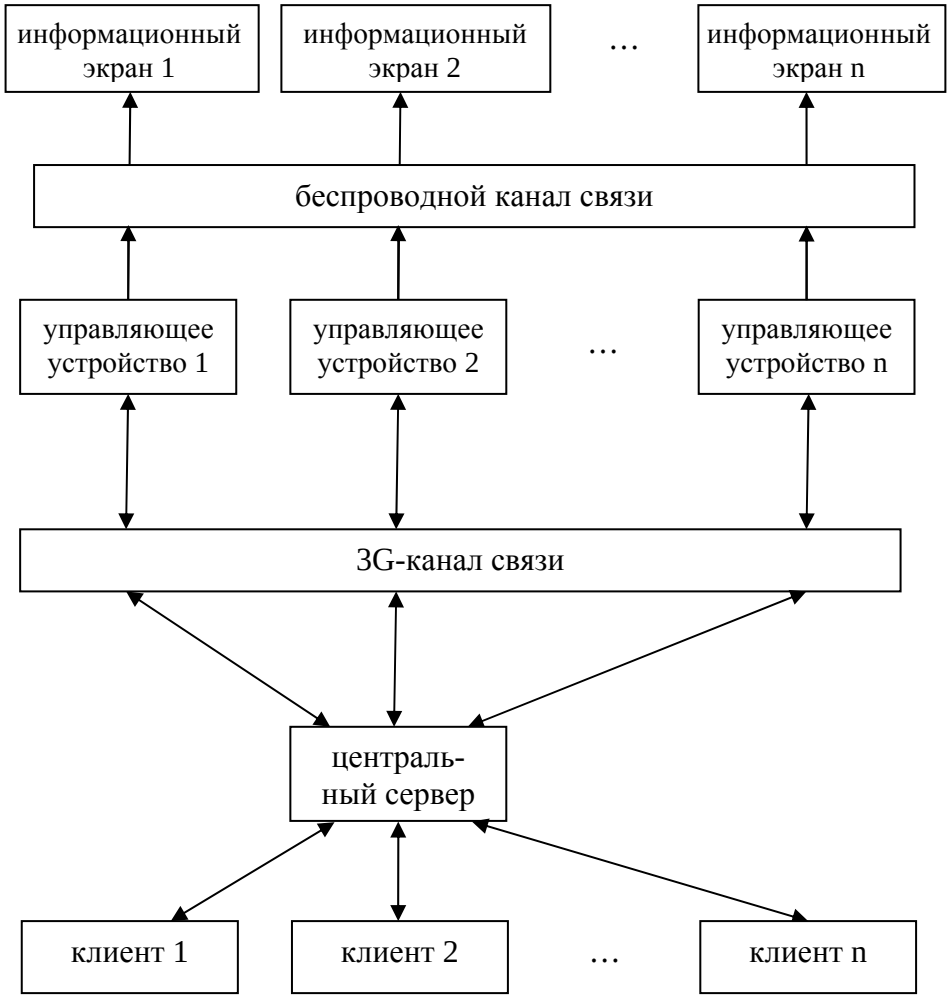


Рис. 1. Структурная схема системы «Электронный гид»

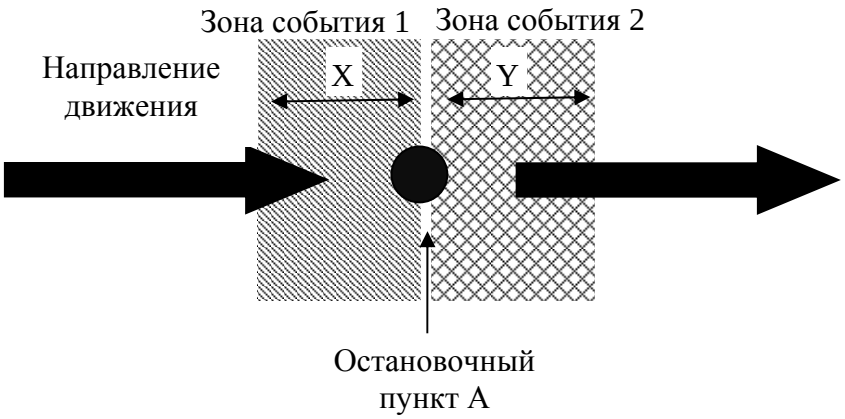


Рис. 2. Схематическое изображение процесса обработки данных о маршруте следования: X, Y – длина зоны события 1 и 2 соответственно

После окончания посадки пассажиров, как только транспортное средство покинет зону события 2, головное устройство выполнит команду «Отправление по маршруту». Погрешность определения координат связана с собственной погрешностью GPS-технологии, а также с особенностями приема спутникового сигнала в разных частях города и при различных погодных условиях. Устойчивая работа системы соответствует точной обработке событий 1 и 2. Для исключения пропуска событий и ложного их выполнения параметры X и Y были определены экспериментально. Для этого десять раз был пройден маршрут следования троллейбуса по маршруту № 2 (38 остановочных пунктов) с различными заданными значениями X и Y. Было определено количество пропусков событий и ложных их выполнений для разных значений X и Y. Результаты приведены в табл. 1 и на рис. 3.

Табл. 1. Статистика ошибок при обработке событий для разных параметров маршрута

X, Y	Количество пропусков события 1 N_1	Количество ложных срабатываний события 2 N_2
40	20	17
50	21	11
60	4	8
70	1	5
80	0	1
90	0	0
100	0	0
110	0	0
120	0	0
130	0	0
140	0	0

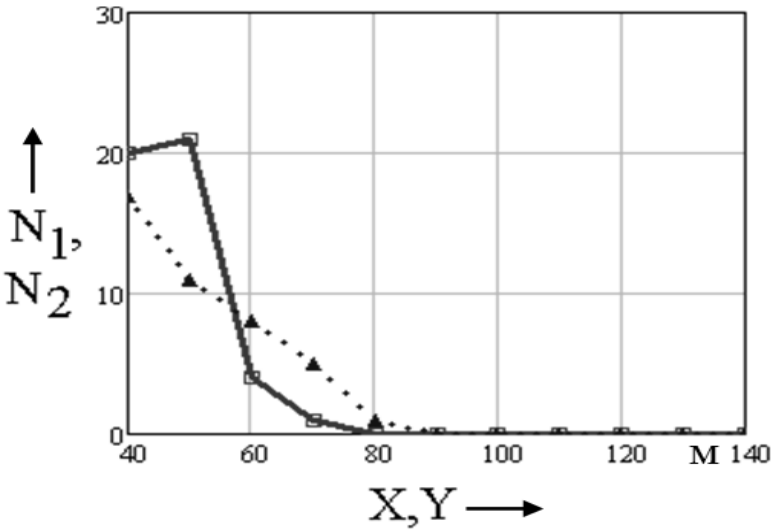


Рис. 3. Зависимость количества пропусков событий 1 (сплошная кривая) и ложных срабатываний события 2 (пунктирная кривая) от параметров X и Y соответственно

Как видно из рис. 3, количество ошибок резко сокращается с ростом параметров X, Y. Так, при X, Y ≥ 80 м ошибок при обработке событий не наблюдалось. Для увеличения надежности работы системы были выбраны значения X = 100 м, Y = 120 м. Эксперимент не выявил значительных отличий работы системы при разных погодных условиях.

Информационные экраны, устанавливаемые в салоны автобусов (троллейбусов и др.), являются основным средством передачи визуальной информации. Внешний вид информационного экрана представлен на рис. 4.

Рис. 4. Информационный экран с диагональю 22…30 дюймов

На экране отображены маршрут следования, текущая и две следующие остановки, карта города и др. Программное обеспечение автоматически (по GPS-данным) определяет местоположение троллейбуса (автобуса) и визуально подсвечивает текущую и следующие остановки.

Непосредственно на остановках на экран крупным шрифтом выводится название остановки (на нескольких языках). На перегонах между станциями на экран может быть выведена видеоинформация о культурных и архитектурных объектах, расположенных поблизости от остановок маршрута, а также информация о гостиницах, спортивных сооружениях, вокзалах, прогноз погоды, курсы валют и др. Кроме того, рекламная информация (магазины, кафе, рестораны) может быть выведена в привязке к местности и времени. Например, днем может выводиться реклама ресторана, расположенного около данной остановки, с обеденным меню, а вечером – реклама того же ресторана с вечерней программой и т. д.

Устройство располагают так, чтобы экран был виден пассажирам, например, в передней части автобуса (троллейбуса), как показано на рис. 5.

Информация о местоположении каждого транспортного средства может передаваться на диспетчерский пункт в автопарке в режиме реального времени через 3G-канал связи (режим GPS-трекера); информация с центрального сервера – клиентам, в качестве которых

могут выступать любые устройства, подключенные к сети Интернет. Администрация транспортного предприятия определяет правила доступа к серверу. Имеется возможность передавать данную информацию на смартфоны пользователей через сеть Интернет. Система также выполняет функцию видеорегистратора с возможностью передачи «картинки» на сервер в реальном времени, что может использоваться специальными службами. Сервер анализирует информацию о пробках, что полезно для служб города.

Рис. 5. Примерное расположение информационного экрана в салоне автобуса

Выводы

Создана инновационная автоматизированная информационно-рекламная система для общественного транспорта «Электронный гид». В состав системы входят *информационные мультимедийные экраны*, устанавливаемые в салонах автобусов, троллейбусов, маршрутных такси, *управляющие устройства* (смартфон или планшет, содержащие GPS- и 3G-модули), работающие в автоматическом режиме, *центральный сервер*, администрирующий систему.

Создано программное обеспечение, управляющее работой составных частей системы «Электронный гид».

На основе экспериментов определены оптимальные параметры работы отдельных узлов рассматриваемой системы.

Пилотный проект системы «Электронный гид» внедрен в троллейбусном парке № 1 г. Могилева на троллейбусном маршруте № 2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сарвиров, Н.** Новый формат пассажирских перевозок / Н. Сарвиров // Наука и инновации. – 2011. – № 2 (96). – С. 16–18.

2. **Старовойтова, Е.** На новый уровень / Е. Старовойтова // Транспортник Столицы. – 2009. – 6 февр. – С. 3.

3. **Рето, М.** HTML, ANDROID 2. Программирование приложений для планшетных компьютеров и смартфонов / М. Рето. – М. : Эксмо, 2011. – 440 с. : ил.

4. HTML, ANDROID 2. Программирование на Java для нового поколения мобильных устройств / З. Медникс, Л. Дорнин, Б. Мик, М. Накамура. – М. : Эксмо, 2012. – 226 с. : ил.

5. **Бейли, Л.** Изучаем PHP и MySQL / Л. Бейли, М. Моррисон. – М. : Эксмо, 2010. – 170 с. : ил.

6. **Прохоренок, М.** HTML, JavaScript, PHP и MySQL. Джентльменский набор Web-мастера / М. Прохоренок. – СПб. : БХВ-Петербург, 2010. – 211 с. : ил.

Статья сдана в редакцию 9 июня 2016 года

Фёдор Михайлович Трухачёв, канд. физ.-мат. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
Артём Иванович Гуторов, магистрант, Белорусско-Российский университет.
Сергей Владимирович Болотов, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.

Fedor Mikhailovich Truhachev, PhD (Physics & Mathematics), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
Artem Ivanovich Gutorov, MSc student, Belarusian-Russian University.
Sergey Vladimirovich Bolotov, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 620.179.13.05

И. С. Мельникова, К. Н. Дайнеко

ВЫЯВЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ДОРОЖНЫХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ И ЦЕМЕНТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ ТЕПЛОВИЗИОННЫМ МЕТОДОМ И АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ КОНТРОЛЯ

UDC 620.179.13.05

I. S. Melnikova, K. N. Daineko

DETECTION OF DEFECTS OF ASPHALT AND CEMENT ROAD PAVEMENTS USING THE THERMOGRAPHIC CONTROL METHOD AND AUTOMATED PROCESSING OF THE CONTROL RESULTS

Аннотация

Рассматриваются результаты экспериментальных исследований по обнаружению методом тепловизионного контроля наиболее распространенных поверхностных дефектов дорожных асфальтобетонных и цементобетонных покрытий – трещин. Отдельное внимание уделяется описанию разработанного программного обеспечения для автоматизации обработки получаемых термограмм покрытия и расчета площадей дефектных областей.

Ключевые слова:

тепловизор, асфальтобетон, цементобетон, трещина, программное обеспечение, площадь дефектной области.

Abstract

The results of the research into detection of the most common asphalt and concrete road pavement defects – cracks – are presented in the article. Special attention is paid to the description of the developed software to automate the processing of pavement thermograms and the calculation of defect areas.

Key words:

thermographic camera, asphalt concrete, cement concrete, crack, software, defect area.

Введение

Контроль эксплуатационного состояния республиканских автомобильных дорог общего пользования основан на оценке степени соответствия нормативным требованиям переменных параметров и характеристик дороги на базе теории прочности и надежности конструкции. Такие параметры, как ровность, шероховатость, прочность и другие, изменяются под действием транспортной нагрузки и погодно-климатических факторов. Кроме того, во многом техническое состояние дорог зависит от мероприятий по их содержанию: правильности выбора необходимых мер по содержанию и своевременности их выполнения.

Ежегодно в Республике Беларусь осуществляются визуальное и инструментальное обследования сети республиканских дорог общего пользования

© Мельникова И. С., Дайнеко К. Н., 2016

протяженностью свыше 15 тыс. км. Визуальное обследование включает в себя измерение геометрических параметров автомобильных дорог (ширина проезжей части, обочины, уклоны) и поверхностных дефектов дорожного покрытия и конструкции дорожной одежды. Инструментальное обследование подразумевает определение транспортно-эксплуатационных параметров дорог, таких как ровность и колейность на покрытии (измеряется с помощью установок «Профилограф», «ЛазерПроф», ИВМП-1М), упругий прогиб дорожной одежды (с помощью дефлектометра падающего груза, например, FWD PRI 2100), коэффициент сцепления колеса автомобиля с покрытием (с помощью установки ПКРС-2у), интенсивность движения транспортных средств (фиксируется на дорожно-измерительных станциях).

Для визуального определения площадей поверхностных дефектов дорожных покрытий РУП «Белорусский дорожный инженерно-технический центр» использует лабораторию визуального линейного сканирования LineScan с последующей обработкой полученных фотоматериалов с помощью специального компьютерного обеспечения.

Предлагается проводить диагностику дефектов дорожной конструкции методом тепловизионного контроля. В отличие от визуально-оптического контроля, использование метода термографии гарантирует более высокий контраст между изображениями дефектной и бездефектной областей [1–2]. Также разработаны система распознавания поверхностных дефектов дорожных покрытий и соответствующее программное обеспечение.

Методы дефектоскопии дорожных покрытий

Для обнаружения поверхностных дефектов дорожных покрытий, возникающих в результате превышения допустимых механических или термических напряжений, целесообразно применять поверхностный метод визуально-оптического контроля. Эффективность метода зависит от правильности выбора геометрических, спектральных, светотехнических, временных характеристик и условий освещения и наблюдения. Известно, что максимальный контраст дефекта необходимо обеспечивать подбором углов освещения и наблюдения спектра и интенсивности источника, а также состояния поляризации и когерентности света [3].

Работа измерительной лаборатории LineScan основана на применении высокоскоростной специализированной цифровой камеры совместно с системой освещения и цифровым одометром. Получение изображения поверхности дорожного покрытия осуществляется в соответствии с этапами процесса фотосъемки: камера фиксирует не саму исследуемую поверхность, а свет, отраженный от нее. Принцип работы камеры представлен на рис. 1: отраженный от исследуемого объекта свет проходит через объектив 1 камеры, попадает на зеркало 2, затем – на фокусировочный экран 5, проходит через конденсорную линзу 6 и призму 7, становится видимым в окуляре 8, а при срабатывании затвора 3 изображение проецируется на светочувствительную матрицу 4 [4]. При съемке покрытия на скоростях до 90 км/ч каждая строка шириной 1 или 2 мм добавляется к предыдущим строкам, образуя непрерывную картину покрытия (см. рис. 1, б) [5]. Несовершенство метода проявляется в недостаточном контрасте изображения при выявлении небольших дефектов на ранней стадии их возникновения, например, поверхностных трещин шириной раскрытия 1…2 мм и так называемых «белых трещин», которые не дают достаточного контраста при съемке поверхности покрытия обычной цифровой фото- или видеокамерой. Кроме того, программное обеспечение по обработке полученных фотографий в результате автоматического фотосканирования не позволяет выявлять трещины шириной

раскрытия до 3…5 мм [1].

В Европе и Канаде широкое распространение для обнаружения поверхностных дефектов и определения структуры покрытия получили системы лазерного дорожного сканирования [6, 7]. Система сканирования основана на использовании высокоскоростных оптических камер и линейных лазерных проекторов, позволяющих получить как двухмерное, так и трехмерное изображение профиля дороги. Сканирование может проводиться вне зависимости от времени суток и типа дорожного покрытия на скоростях до 100 км/ч при максимальной ширине захвата дорожного покрытия в 4 м. Обработка полученных данных осуществляется специальным программным обеспечением, распознающим трещины на поверхности покрытия, дорожную разметку, колею и выбоины, макротекстуру покрытия (рис. 2).

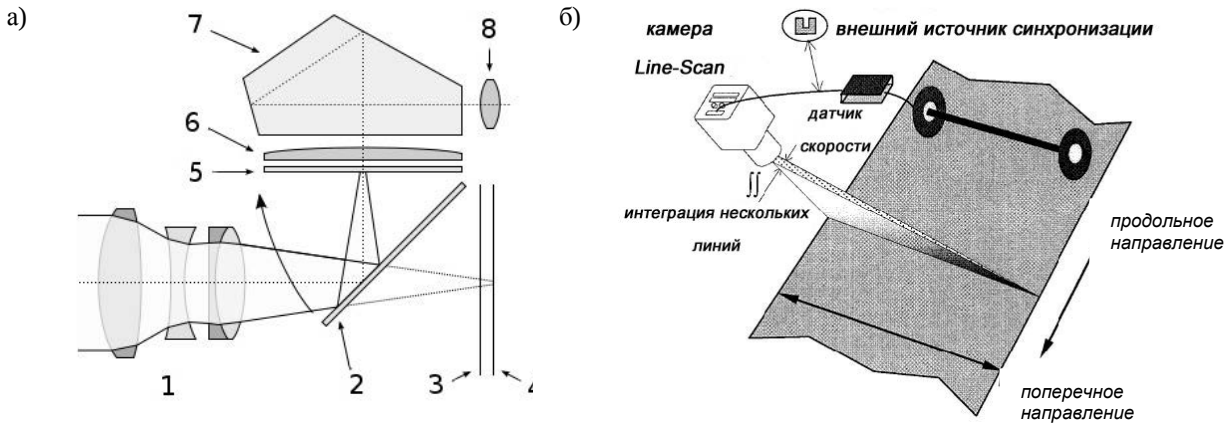


Рис. 1. Принцип работы цифровой камеры (а) и лаборатории LineScan (б): 1 – объектив камеры; 2 – зеркало; 3 – затвор; 4 – матрица; 5 – фокусировочный экран; 6 – конденсорная линза; 7 – пентапризма; 8 – окуляр

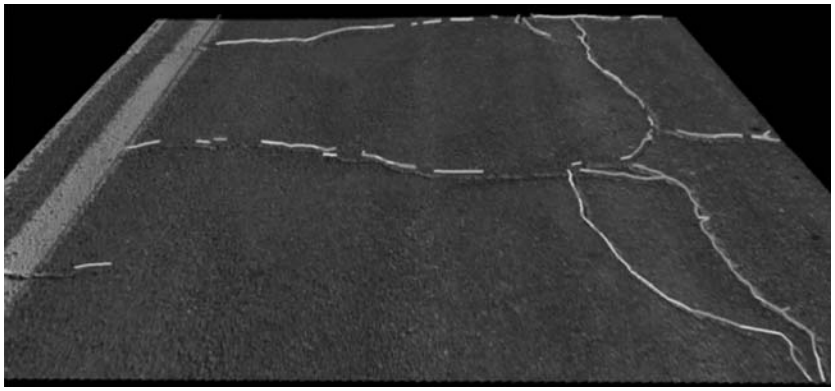


Рис. 2. Изображение поверхности покрытия, полученное с применением системы лазерного определения дефектов LCMS^{TM} канадской компании «Пэйвметрикс» (Pavemetrics)

Проведенные исследования показали, что для выявления поверхностных повреждений дорожных покрытий целесообразно также применять метод термографии. Данный метод основан на получении с помощью прибора (тепловизора) теплового изображения объекта контроля, которое создается не за счет фиксации отраженного от объекта света или лазерного луча, а лишь за счет

непосредственно самого теплового излучения объекта или различий в излучательной способности поверхности объекта контроля.

Сферы применения метода термографии

В термографии используется инфракрасный диапазон спектра электромагнитного излучения: условно от 0,75 до 100 мкм. При наведении на объект исследования тепловизионная камера принимает излучение от самого объекта, а также от окружающей среды, излучение от которой отражается поверхностью объекта. Проходя через атмосферу, обе эти компоненты излучения ослабляются, в результате чего появляется третья составляющая излучения, создаваемая атмосферой (рис. 3) [8]. При этом, проводя измерения, пренебрегают некоторыми факторами: например, рассеянием солнечного света в атмосфере или рассеянным излучением от сильных источников, находящихся вне поля зрения.

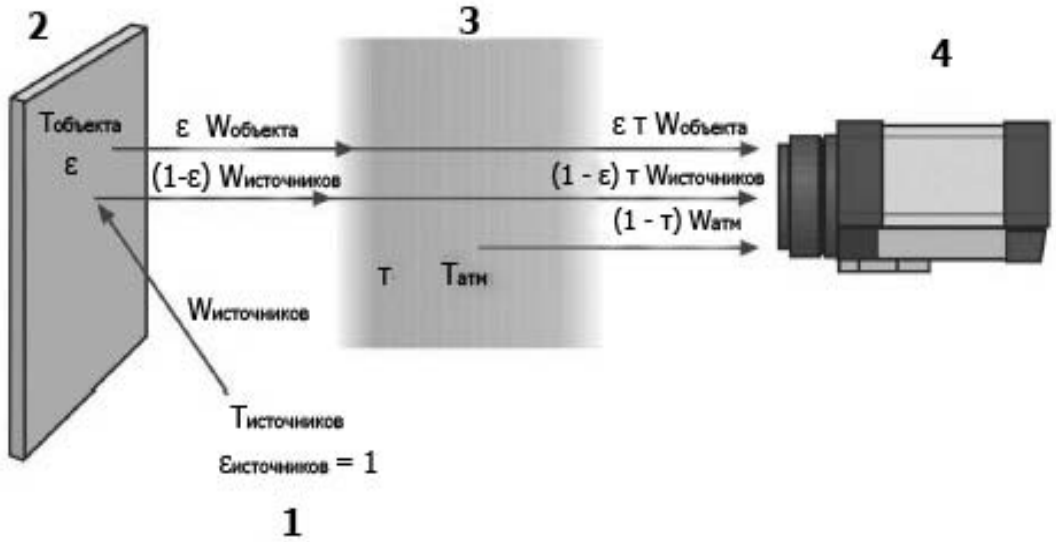


Рис. 3. Схема при общих термографических измерениях: 1 – среда; 2 – объект исследования; 3 – атмосфера; 4 – камера

Согласно схеме (см. рис. 3) можно выделить три слагаемых принимаемой тепловизионной камерой энергии излучения:

1) светимость объекта

$$W'_{\text{объекта}} = \varepsilon \cdot \tau \cdot W_{\text{объекта}},$$

где ε – светимость объекта (коэффициент излучения); τ – коэффициент пропускания атмосферы; $W_{\text{объекта}}$ – энергия излучения;

2) отраженное излучение окружающих источников

$$W'_{\text{источников}} = (1-\varepsilon) \cdot \tau \cdot W_{\text{источников}},$$

где $W_{\text{источников}}$ – энергия излучения стороннего источника;

3) светимость атмосферы

$$W'_{\text{атм}} = (1-\tau) \cdot \tau \cdot W_{\text{атм}},$$

где $(1-\tau)$ – светимость атмосферы; $W_{\text{атм}}$ – энергия излучения атмосферы.

Таким образом, оператор при работе с тепловизором должен учитывать излучательную способность объекта измерения, относительную влажность, температуру атмосферного воздуха, расстояние до объекта, отраженную температуру сторонних объектов. В не-

которых случаях задача точного определения некоторых параметров является для оператора трудновыполнимой, но при отсутствии сильных и крупных источников излучения эти сложности незначительные.

Тепловизор, прибор для получения изображения исследуемого объекта, в общем состоит из объектива (оптической системы), приемника инфракрасного излучения с чувствительным элементом, блока обработки (усиления) для создания и отображения термограммы объекта в виде изображения для дальнейшего анализа. Тепловизоры широко применяют в промышленности, медицине, строительстве. Так, при использовании тепловизионных камер в промышленности обнаруживают проблемы перегрева электрических и механических сетей, утечки, точные места расположения механических и электрических коммуникаций, контролируют качество сварных швов, осуществляют профилактическое обслуживание производственных механизмов (двигатели, подшипники, шестерни, насосы) и проверку электрических систем, обеспечения качества производства [9]. В частности, термографию используют для контроля в высокотехнологичных отраслях промышленности (авиация, нефтехимическая отрасль); в медицине – для диагностики заболеваний, обнаружения травм и мониторинга гипертермии. При диагностике зданий с применением тепловизионной камеры оцениваются тепловые отклонения от нормы фасада и крыши внутри и снаружи здания, производится обнаружение и анализ причин утечки тепла, аномалий в электрических сетях, контролируется качество при устройстве изоляции.

В дорожном строительстве термографию используют при контроле качества укладываемой теплой или горячей асфальтобетонной смеси: оценивают температуру смеси до укладки и равномерность температуры уже уложенного слоя. Целесообразно применение метода тепловизионного контроля и для определения дефектов дорожных асфальтобетонных покрытий.

Выявление дефектов дорожных асфальтобетонных и цементобетонных покрытий методом термографии

Проведенные исследования математических моделей дефектных областей в слое покрытия, экспериментальные тепловизионные исследования в лабораторных условиях и на участке автомобильной дороги с асфальтобетонным покрытием показали, что повреждения в верхнем слое покрытия выявляются с помощью тепловизора с высоким контрастом [10, 11].

Была изучена возможность применения метода тепловизионного контроля для обследований цементобетонных дорожных покрытий и выполнено сравнение выявления дефектов на покрытиях обоих типов.

Согласно действующим техническим нормативно-правовым актам Беларуси различают следующие виды дефектов дорожных покрытий [12]:

1) для асфальтобетонных покрытий: трещины отдельные, трещины частые, сетка трещин, выбоины, колейность, выкрашивание и шелушение, разрушение кромок, заплаты;

2) для цементобетонных покрытий: трещины, шелушение, незаполненные швы, повреждение кромок и швов, смещение смежных элементов, заплаты, разрушение плит.

Наиболее распространенным видом дефектов являются трещины. Трещины также наиболее трудны в определении визуально-оптическим методом при их небольшой ширине раскрытия или при заполнении водой, песком или нефтепродуктами от автомобилей. Исследования показали, что при дефектоскопии методом тепловизионного контроля ни размер, ни заполнение трещин посторонними материалами не оказы-

вают влияние на получаемые термограммы [13].

Исследования на участках автомобильных дорог с асфальтобетонным и цементобетонным покрытиями были проведены в черте г. Могилева (р-н ул. Гомельское шоссе). Температура покрытий измерялась на двух участках дорог с различным покрытием в летнее время года в июле и августе дважды в день: в утренние и вечерние часы. Для измерений использовался тепловизор FLIR T440 со спектральным диапазоном от 7,5 до 13 мкм и линзой 25 × 19º, позволяющий получить термограмму объекта в виде изображения разрешением 320 × 240 пикселей.

По результатам измерения к 8.00 ч при температуре воздуха 21 ºС температура асфальтобетонного покрытия составляла 24,6 ºС, цементобетонного – 25,9 ºС. К 20.00 ч при дневной температуре воздуха 30…32 ºС асфальтобетон остывал до 33,3 ºС, цементобетон – до 34,5 ºС. Следовательно, цементобетонное покрытие нагревается за день и остывает к вечеру чуть медленнее асфальтобетонного, что обусловлено разницей в теплотехнических характеристиках обоих строительных материалов: теплопроводность асфальтобетона составляет 1,05 Вт/(м · град), цементобетона – 1,92 Вт/(м · град), теплоемкость асфальтобетона – 1680 Дж/(кг · град), цементобетона – 1000 Дж/(кг · град). Термограммы и образцы покрытий дорог с дефектами в виде трещин представлены на рис. 4: средняя температура асфальтобетонного покрытия составляла 33,3 ºС, цементобетонного – 34,5 ºС [14].

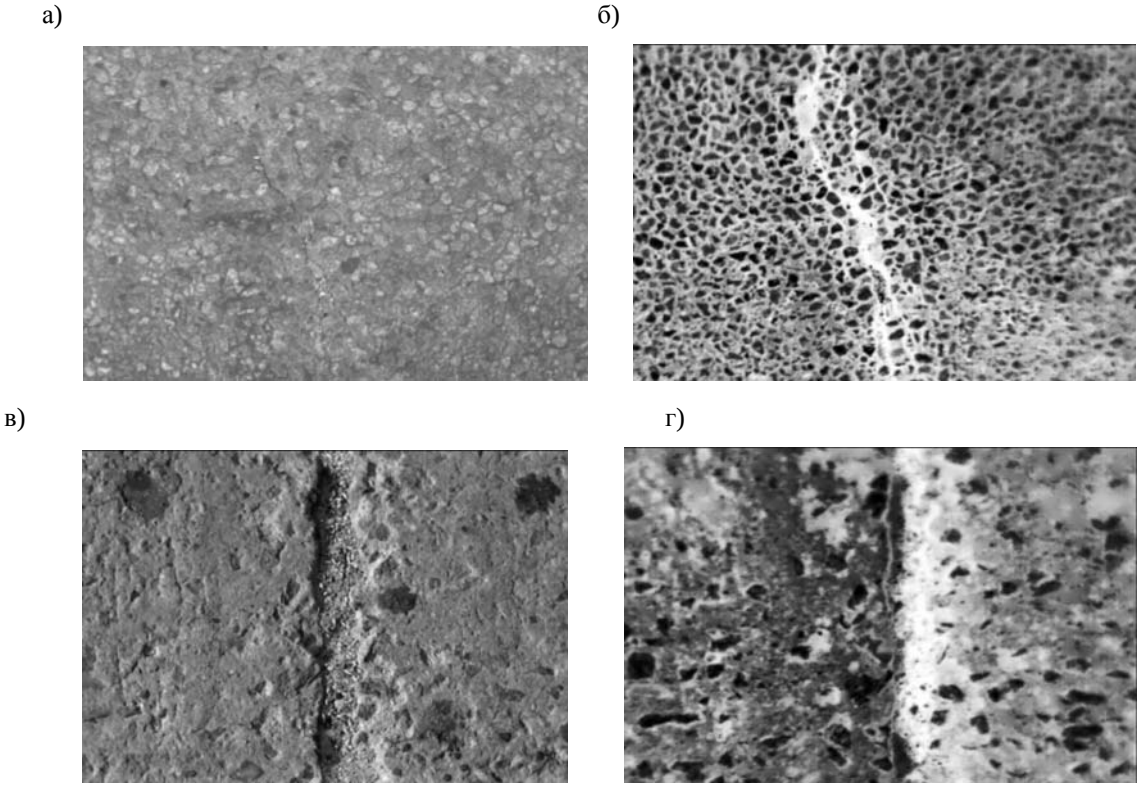


Рис. 4. Образцы и соответствующие им термограммы асфальтобетонного покрытия с трещиной (а и б) и цементобетонного покрытия с трещиной (в и г)

Таким образом, можно говорить о выявлении повреждений дорожных покрытий методом термографии с высоким контрастом как для асфальтобетонных покрытий, так и для цементобетонных.

Важно отметить также, что для

выявления дефектов необходимо проводить диагностику в теплое время года вечером после захода солнца. В этих условиях влияние солнечного излучения исключено, поверхность покрытия уже начала охлаждаться естественным путем, а область с дефектом все еще остается хорошо прогретой. Благодаря этой разнице в температурах бездефектной и дефектной областей обеспечивается высокий контраст при получении термограммы поверхности покрытия.

Разработка программного обеспечения для обработки результатов измерений

Сравнение результатов регистрации трещин с помощью тепловизора с результатами диагностики системой визуального сканирования уже показало преимущество метода термографии перед съемкой оптическими фото- и видеокамерами, т. к. тепловизионный метод дает возможность четко выявлять трещины раскрытием до 1 мм [1]. Однако стандартное программное обеспечение для обработки термограмм не позволяет автоматизированно выявить и вычислить итоговую дефектную область на покрытии.

Разработанное авторами программное обеспечение позволяет производить анализ получаемых термограмм с целью обнаружения поверхностных дефектов покрытия. Также программа предоставляет возможность в режиме реального времени обрабатывать видеоданные и определять, есть ли дефекты на поверхности покрытия.

Термограмма для последующей автоматизированной обработки программой прежде всего преобразуется в массив данных, состоящий из значений измеренных температур поверхности покрытия. Каждый пиксель имеет определенное значение температуры в относительных либо абсолютных единицах. Далее массив обрабатывается программой для выявления дефектных областей.

Вид окна программы, появляющегося при ее запуске, представлен на рис. 5. Язык программирования – Visual FoxPro 9.0 [15].

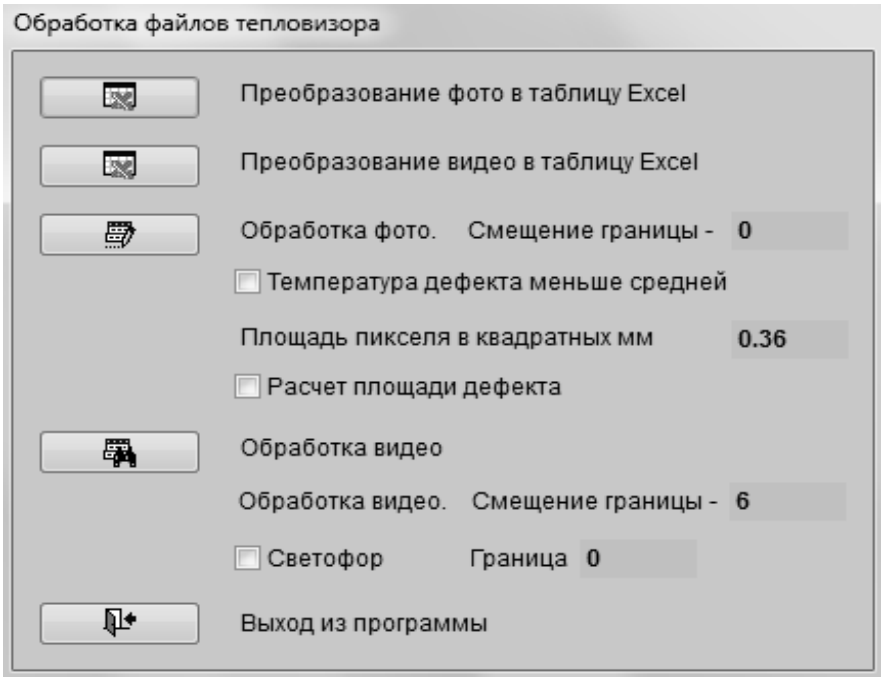


Рис. 5. Окно программы для обработки термограмм

Рассмотрим функции, которые выполняет программное обеспечение.

Функция «Преобразование фото в таблицу Excel» предназначена для получения изображения распределения температур на поверхности покрытия дороги. При ее работе в среде Excel формируется массив данных со значениями температур, присвоенных каждому пикселю термограммы. Последующая визуализация массива осуществляется построением диаграммы «Поверхность».

Функция «Преобразовать видео в таблицу Excel» предназначена для получения изображения распределения температур на поверхности покрытия дороги и анализа полученных с помощью тепловизора кадров видеозаписи. После запуска функции из файла выделяется двухмерный массив значений измеренных температур и ведется последующая его обработка.

Функция «Обработка фото» предназначена для автоматического анализа полученного массива данных с температурами с целью определения наличия дефектных областей и расчета площади дефектов на поверхности покрытия. Сначала программа выполняет анализ исходного массива данных с температурами: строится таблица с двумя столбцами – с измеренными тепловизором значениями (столбец 1) и количеством таких значений в массиве (столбец 2). Затем определяются максимальное значение в столбце 2 и соответствующее ему значение в столбце 1, рассчитываются статистические характеристики распределения. Далее измеренные значения в массиве заменяются на 0 для бездефектной области и на 1 для области дефектов, подсчитывается количество элементов массива в дефектной области. В зависимости от условий проведения исследования в форме программы предварительно устанавливается «галочка» напротив поля «Температура дефекта меньше средней» в случае, если температура в зоне дефекта ниже температуры бездефектной области; в противном случае «галочку» не ставят. Для расчета площади дефектов на исследуемой поверхности дорожного покрытия в форме программы устанавливают «галочку» в поле «Расчет площади дефекта» и задают площадь одного пикселя. Данная функция позволяет определить площадь дефектов путем умножения количества пикселей, которые относятся к дефектам, на площадь одного пикселя. Площадь пикселя зависит от расстояния между камерой и контролируемой поверхностью и ее находят в каждом случае экспериментально.

Функция «Обработка видео» предназначена для автоматического анализа видеокадров термограмм поверхности дорожного покрытия. Она работает аналогично «Обработке фото»: из видеомассива выделяются отдельные массивы данных температур, соответствующие одному кадру, затем каждый отдельный кадр (массив) обрабатывается. Для оперативной оценки результатов анализа включается команда «Светофор», которая позволяет в реальном времени выводить сигналы о наличии дефектов на кадре (включается красный сигнал) или их отсутствии (включается зеленый сигнал). Для управления сигналом светофора в форме предварительно устанавливается граничное значение площади дефектов, превышение которого означает наличие недопустимых дефектов.

В результате автоматизированной обработки массива данных с температурами поверхности покрытия имеем трехмерное изображение, на котором четко видны дефектные и бездефектные области (рис. 6).

Работа программы основана на подтвержденной теоретически и экспериментально гипотезе о том, что при измерении температур поверхности покрытия в теплое время года после захода солнца области с дефектами имеют более высокую температуру, чем поверхность покрытия, что и выявляется после выполнения функций программы.

а) б)

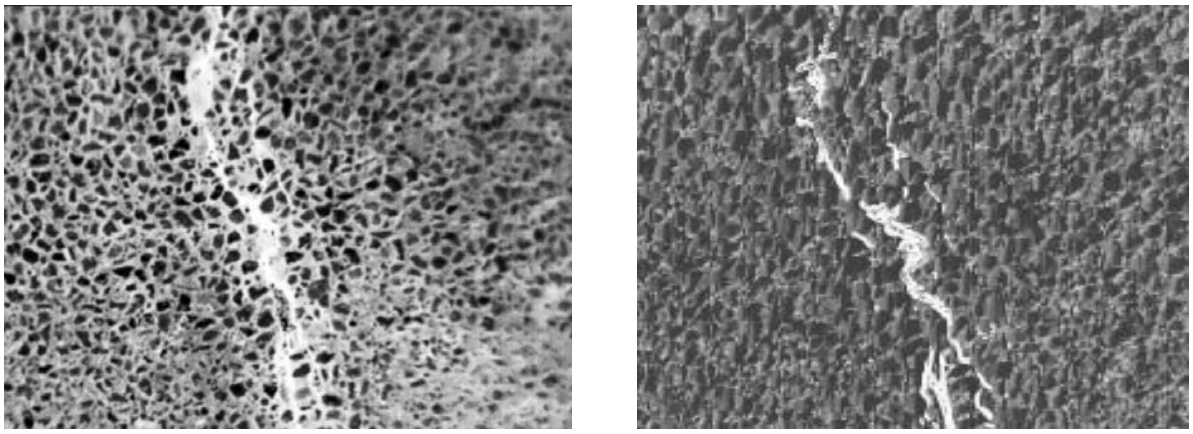


Рис. 6. Результат автоматизированной обработки массива данных с температурами: а – термограмма асфальтобетонного покрытия с трещиной; б – результат обработки термограммы

Выводы

Таким образом, было рассмотрено применение визуально-оптического метода и метода лазерного сканирования для дефектоскопии дорожных покрытий, показана целесообразность тепловизионного метода контроля для обнаружения поверхностных повреждений асфальтобетонных и цементобетонных покрытий. Метод тепловизионного контроля за счет учета излучения самого исследуемого объекта, а не фиксации отраженного от объекта света, позволяет в определенных условиях с высоким контрастом выявлять трещины на ранней стадии их возникновения шириной раскрытия 1…2 мм, которые не видны или очень слабо различимы при использовании других методов контроля. Метод применим как для асфальтобетонного дорожного покрытия, так и для цементобетонного.

Разработанное программное обеспечение позволяет автоматизировать обработку термограмм и выявлять дефектные области, рассчитывать площади дефектов. Принцип работы программы заключается в представлении термограммы в виде массива данных с температурами, т. е. температуры каждого пикселя формируют массив данных. Так как температура дефектной области выше или ниже температуры поверхности покрытия, то последующая автоматизированная обработка данных позволяет выделить области с дефектами, отличные по температурам. Дефектная область представляется графически аналогично программам по обработке результатов визуально-оптического контроля и лазерного сканирования. Преимущество разработанного программного обеспечения заключается в том, что оно дает возможность автоматизированно определять наличие поверхностных дефектов на ранней стадии их возникновения, выполнять расчет площадей дефектов, обрабатывать видеоинформацию, снятую тепловизором, с автоматическим представлением ее в виде отдельных кадров. Программное обеспечение может применяться в дорожной отрасли для диагностики поверхностных дефектов асфальтобетонных и цементобетонных покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мельникова, И. С.** Выявление поверхностных повреждений дорожных покрытий методом тепловизионного контроля / И. С. Мельникова, В. И. Борисов // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2014. – № 4 (45). – С. 117–128.

2. **Ермолов, И. Н.** Методы и средства неразрушающего контроля / И. Н. Ермолов, Ю. Я. Останин. – М. : Высш. шк., 1988. – 368 с.

3. Методы неразрушающего контроля : учеб. пособие / Н. И. Кашубский [и др.]. – Красноярск : ИПК СФУ, 2009. – Ч. 1. – 108 с.

4. Цифрозеркальная камера : основные сведения [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http : 101tema.ru/content/urok-3-1-tsifrozerkalnaya-kamera-osnovnye-svedeniya-chast-1. – Дата доступа : 20.04.2016.

5. **Wang, K.** Automated survey and visual database development for airport and local highway pavement / K. Wang // Final Report of Mack-Blackwell Transportation Center. – USA : University of Arkansas, 2007.

6. Laser Scanning on Road Pavements. A New Approach for Characterizing Surface Texture / G. Bitelli [et al.] // Sensors (Basel) [Electronic resource]. – 2012. – № 12. – Mode of access : http : // www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3444093. – Date of access : 30.07.2015.

7. LCMS™ – Laser Crack Measurement System [Electronic resource] / Pavemetrics. – Quebec, 2015. – Mode of access : http : // pavemetrics.com/en/lcms.html. – Date of access: 17.08.2015.

8. Тепловизоры для инспекции зданий [Электронный ресурс] / FLIR Systems. – Режим доступа : http : // www.flir.ru/instruments/building/display/?id=47239. – Дата доступа : 20.04.2016.

9. Термография и строительство – наземная термография [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http : // teplovizo.ru/termografiya-sfery-primeneniya.htm. – Дата доступа : 20.04.2016.

10. **Мельникова, И. С.** Применение метода тепловизионного контроля для обнаружения дефектов дорожных покрытий / И. С. Мельникова, В. И. Борисов // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов : материалы 5-й Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев, 2014. – С. 60–62.

11. Система неразрушающего контроля. Виды (методы) и технология неразрушающего контроля. Термины и определения : справ. пособие / П. П. Бирюкова [и др.]. – М. : Науч.-техн. центр по безопасности в промышленности Гостехнадзора России, 2003. – 392 с.

12. **ТКП 140-2015.** Автомобильные дороги. Порядок выполнения диагностики. – Минск : БелдорНИИ, 2015. – 68 с.

13. **Борисов, В. И.** Влияние внешних условий на выявление дефектов дорожных покрытий методом термографии / В. И. Борисов, И. С. Мельникова // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев, 2015. – С. 282.

14. **Мельникова, И. С.** Исследование температурного режима дорожных покрытий различных типов методом термографии / И. С. Мельникова, Ю. В. Ковалев, К. Н. Дайнеко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев, 2015. – С. 134.

15. **Борисов, В. И.** Компьютерная программа для обработки термограмм дорожных покрытий с поверхностными дефектами / В. И. Борисов, И. С. Мельникова // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев, 2015. – С. 283.

Статья сдана в редакцию 25 апреля 2016 года

Ирина Сергеевна Мельникова, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет. E-mail: Rin_m@mail.ru.
Константин Николаевич Дайнеко, студент, Белорусско-Российский университет. E-mail: Mercedeshome@mail.ru.

Irina Sergeyevna Melnikova, senior lecturer, Belarusian-Russian University. E-mail: Rin_m@mail.ru.
Konstantin Nikolayevich Daineko, student, Belarusian-Russian University. E-mail: Mercedeshome@mail.ru.

ФИЗИКА

УДК 535.31 + 621.658.011

А. Г. Старовойтов, А. Н. Василенко, А. В. Хомченко, И. А. Черкасова

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЯ МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИМЕТРИИ

UDC 535.31 + 621.658.011

A. G. Starovoytov, A. N. Vasilenko, A. V. Khomchenko, I. A. Cherkasova

ESTIMATION OF BIREFRINGENCE MEASUREMENT INACCURACY BY USE OF OPTICAL POLARIMETRY

Аннотация

Выполнена оценка влияния погрешности измерения угла ориентации образца относительно плоскости пропускания поляризатора, интенсивности поляризованного света и разности фаз между волнами различной поляризации на точность измерения параметров анализируемой структуры методом оптической поляриметрии. Представлены результаты анализа влияния погрешности установки поляризатора относительно плоскости, в которой ориентированы главные направления анизотропии образца, на измеряемую величину разности фаз в образцах с линейным двулучепреломлением.

Ключевые слова:

двулучепреломление, разность фаз, метод измерения, неоднородные анизотропные среды, оптическая поляриметрия, погрешности измерения.

Abstract

The assessment has been carried out how a measurement error of the sample orientation angle relative to the transmission plane of the polarizer, the intensity of polarized light and the phase differences between waves of different polarization can influence the accuracy of measuring the parameters of the structure analyzed by use of the optical polarimetry technique. The paper analyzes the effect of inaccuracy in the installation of the polarizer relative to the plane, in which the main directions of the sample anisotropy are oriented, on the value of phase difference in the samples with linear birefringence.

Key words:

birefringence, phase difference, measurement technique, heterogeneous anisotropic media, optical polarimetry, error of measurement.

Введение

Наличие структурных изменений и остаточных напряжений в процессе изготовления оптически прозрачных материалов (химические и оптические волокна, тонкопленочные структуры, закаленное стекло) традиционно контролируется методами оптической поляриметрии, т. к. эти материалы становятся анизотропными, и измерения интенсивности поляризованного света, прошедшего через исследуемый образец, несут информацию о распределении разности фаз, обусловленной различием скорости распространения ортогонально-поляризованных волн при их

© Старовойтов А. Г., Василенко А. Н., Хомченко А. В., Черкасова И. А., 2016

распространении в двулучепреломляющей среде [1–6]. В методах определения разности фаз при линейном двулучепреломлении, получивших название нулевых методов гашения [7], величина двулучепреломления измеряется с помощью различного рода компенсаторов [7–9]. Однако из-за дополнительных погрешностей, возникающих в процессе изготовления, установки и юстировки, такие методы не обеспечивают высокой точности измерения, что сказывается на качестве продукции.

Для корректной оценки параметров и характеристик анизотропных материалов методами оптической поляриметрии необходимо ориентировать плоскость поляризации падающего на образец света относительно главных направлений анизотропии исследуемого материала, например, установить плоскость поляризации падающего света под углом 45° к направлению анизотропии исследуемого материала [4, 10]. Это связано с тем, что использование линейно-поляризованного света позволяет обнаруживать лишь те составляющие анизотропии (механических напряжений), которые расположены в плоскости, перпендикулярной к направлению падения света на образец, а составляющие напряжений, перпендикулярные к этой плоскости, не регистрируются. Линейно-поляризованный свет удобен для количественных измерений сравнительно небольших разностей хода (менее длины волны используемого излучения). При этом регистрируемая разность хода является результатом алгебраического сложения разностей хода, вносимых отдельными слоями материала, через которые проходит излучение. Так, если рассматривается, например, толстое стекло, в котором приповерхностный слой сжат, а центральные слои растянуты в том же направлении, то разность хода, вносимая этими слоями, будет друг друга компенсировать, и суммарная разность хода может оказаться равной нулю, несмотря на то, что образец находится под большой нагрузкой.

Учитывая вышесказанное и то, что установку и ориентацию образца необходимо производить перед каждым измерением, оценка влияния погрешности установки поляризатора относительно плоскости, в которой ориентированы главные направления анизотропии образца, на точность измерения параметров анализируемой структуры может оказаться весьма значительной, что обусловливает актуальность таких исследований.

Оценка погрешности измерения двулучепреломления

При измерении двулучепреломления методом оптической поляриметрии существенным является обеспечение заданного угла ориентации плоскости поляризации падающего на образец света относительно главных направлений анизотропии контролируемого материала. При расположении образца под углом 45° к направлению пропускания поляризатора регистрируется максимальное значение интенсивности света, прошедшего через образец, по которому фиксируется факт установления образца в требуемое положение в схеме установки.

Оценим интенсивность света на выходе оптической системы, расположив ее в декартовой системе координат в соответствии с рис. 1 таким образом, чтобы свет распространялся вдоль оси Z, поляризатор 3 находился в плоскости XY, при этом его плоскость пропускания составляла угол α с горизонтальной осью OX, а анализатор 7 располагался за объектом контроля, вносящим разность фаз δ между обыкновенными и необыкновенными лучами. Четвертьволновая пластинка 6 преобразует эллиптическую форму поляризации в линейную. Не нарушая общности, можно считать, что оптическая ось пластинки расположена горизонтально.

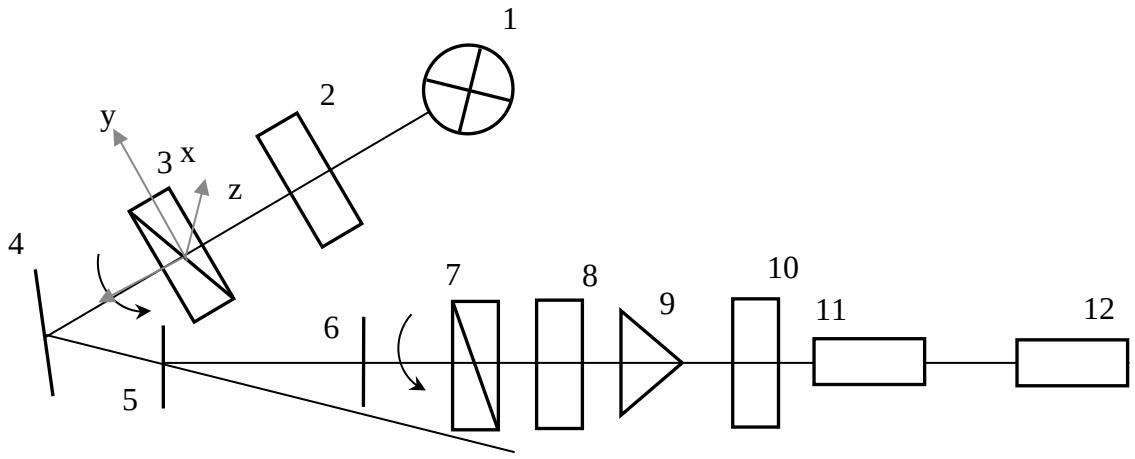


Рис. 1. Схема измерительной установки: 1 – источник; 2 – светофильтр; 3 – поляризатор; 4 – плоское зеркало; 5 – образец; 6 – четвертьволновая пластинка; 7 – анализатор; 8 – фотоприемник; 9 – селективный усилитель; 10 – аналого-цифровой преобразователь; 11 – интерфейс; 12 – компьютер

Плоскость пропускания анализатора образует с осью OX угол γ, причем γ отсчитывается от оси по часовой стрелке. Образец расположен под углом θ к плоскости пропускания поляризатора. Пусть на поляризатор падает пучок неполяризованного света интенсивностью I_0. Тогда интенсивность на выходе из системы имеет вид [5, 6]:

$$I = \frac{I_0}{4}\left[1+\cos 2\gamma\left[\begin{matrix}\left(\cos^2 2\theta+\sin^2 2\theta\cos\delta\right)\times\\ \times\ \cos 2\alpha+\sin 2\theta\cos 2\theta\times\\ \times\left(1-\cos\delta\right)\sin 2\alpha\end{matrix}\right]\right]-$$

$$-\sin 2\gamma\left[\begin{matrix}\sin 2\theta\sin\delta\cos 2\alpha-\\ -\cos 2\theta\sin 2\alpha\sin\delta\end{matrix}\right]. \qquad (1)$$

При вращении анализатора и изменении угла γ соответствующим образом изменяется интенсивность света. Когда плоскость пропускания совпадает с одной из осей эллипса, интенсивность становится максимальной либо минимальной. Следовательно, можно найти ориентацию осей эллипса, приравняв к нулю производную от выражения (1) по параметру γ:

$$\frac{dI}{d\gamma} = -\frac{1}{2}I_0\left[\begin{matrix}\left(\cos^2 2\theta+\sin^2 2\theta\cos\delta\right)\times\\ \times\cos 2\alpha+\sin 2\theta\left(1-\cos\delta\right)\times\\ \times\sin 2\alpha\end{matrix}\right]\times$$

$$\times\sin 2\gamma-\cos 2\gamma\left[\begin{matrix}\sin 2\theta\sin\delta\cos 2\alpha-\\ -\cos 2\theta\sin 2\alpha\sin\delta\end{matrix}\right]=0. \quad (2)$$

Из (2) следует, что максимум (или минимум) интенсивности имеет место в случае, когда

$$\operatorname{tg} 2\gamma = \frac{\left[\begin{matrix}\sin 2\theta\sin\delta\cos 2\gamma-\\ -\cos 2\theta\sin 2\alpha\sin\delta\end{matrix}\right]}{\left[\begin{matrix}\left(\cos^2 2\theta+\sin^2 2\theta\cos\delta\right)\times\\ \times\cos 2\alpha+\sin 2\theta\cos 2\theta\times\\ \times\left(1-\cos\delta\right)\sin 2\alpha\end{matrix}\right]}.$$

При этом если направление пропускания поляризатора расположено в плоскости XOZ, т. е. при $\alpha = 0$, то

$$\operatorname{tg} 2\gamma = \frac{\sin 2\theta\sin\delta}{\cos^2 2\theta+\sin^2 2\theta\cos\delta}. \qquad (3)$$

При точной ориентации образца относительно поляризатора (оси OX) под углом $\theta = 45^\circ$ из выражения (3) следует, что

$$\operatorname{tg} 2\gamma = \operatorname{tg}\delta,$$

а измеряемая разность фаз и угол поворота анализатора связаны соотношением

$$\delta = 2\gamma .$$

В случае наличия погрешности ориентации образца под углом 45°, т. е. при θ = 45° + φ,

$$\operatorname{tg} 2\gamma = \frac{\cos 2\varphi \sin\delta}{\sin^2 2\varphi + \cos^2 2\varphi \cos\delta}. \qquad (4)$$

Абсолютная погрешность измерения текущего значения разности фаз δ составит:

$$\tau = \delta - 2\gamma$$

и, соответственно,

$$\operatorname{tg}\tau = \operatorname{tg}(\delta - 2\gamma) = \frac{\operatorname{tg}\delta - \operatorname{tg} 2\gamma}{1 + \operatorname{tg}\delta \cdot \operatorname{tg} 2\gamma}. \qquad (5)$$

Подставим (4) в (5) и после преобразований получим выражение, позволяющее оценить влияние погрешности ориентации образца относительно поляризатора на измеряемую разность фаз:

$$\operatorname{tg}\tau = \frac{\left[\begin{array}{l}\sin^2 2\varphi \sin\delta - \cos 2\varphi \times \\ \times \left(1 - \cos 2\varphi\right)\sin\delta\cos\delta\end{array}\right]}{\left[\begin{array}{l}\sin^2 2\varphi \cos\delta + \cos^2 2\varphi \times \\ \times \cos\delta + \cos 2\varphi \sin^2\delta\end{array}\right]}. \qquad (6)$$

Зависимость погрешности измерения разности фаз от точности ориентации образца относительно плоскости пропускания поляризатора представлена на рис. 2.

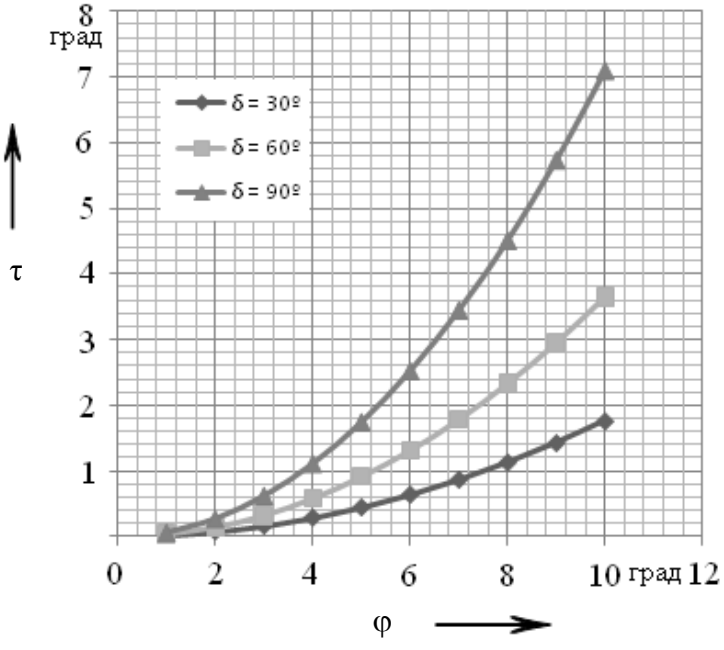


Рис. 2. Зависимость погрешности измерения разности фаз δ от точности ориентации образца относительно плоскости пропускания поляризатора

Из анализа данных, приведенных на рис. 2, следует, что значение τ зависит от измеряемой величины δ, поэтому для оценки максимальной погрешности исследуем функцию (6) на экстремум и из условия $\frac{d\tau}{d\delta} = 0$ после преобразований получим

$$\cos\delta = 1 - \frac{1}{2\cos 2\varphi} - \frac{\sqrt{2+\cos^2\varphi}}{2\cos\varphi\cos 2\varphi}. \quad (7)$$

При заданном значении угла φ выражение (7) позволяет вычислить измеряемую разность фаз δ_{max}, при которой погрешность ее определения достигает максимального значения. Результаты расчетов отражены в табл. 1.

Табл. 1. Зависимость максимального измеряемого значения разности фаз от точности ориентации образца

φ, град	2	4	6	8	10
δ_{max}	111,69	112,39	113,56	115,28	117,59

В экспериментах это приводит к неполному гашению света анализатором. Используя выражение (1), определим интенсивность светового потока, пропускаемого анализатором, при α = 45°:

$$I = \frac{I_0}{2}\sin^2 2\varphi \sin^2\frac{\delta}{2}, \quad (8)$$

при положении образца под углом (45° + φ)

$$I = \frac{I_0}{2}\sin^2 2\varphi \sin^2\frac{\delta}{2}. \quad (9)$$

Из выражения (9) следует, что при δ = 180°n (n – целое число)

$$I = \frac{I_0}{2}\sin^2 2\varphi.$$

При вариациях угла φ максимальное значение отношения I/I_0 может достигать ~1,75 %.

Погрешность измерения двулучепреломления Δn*, связанную с неточной ориентацией образца относительно плоскости пропускания поляризатора на угол φ, можно оценить из выражения [5]

$$\frac{1}{n_e^{*2}} = \frac{\cos^2\varphi}{n_0^2} + \frac{\sin^2\varphi}{n_e^2}$$

или

$$\Delta n^* = \Delta n \sin^2\varphi,$$

где Δn – величина двулучепреломления при φ = 0, $\Delta n = n_e - n_o$; n_e и n_o – показатель преломления обыкновенной и необыкновенной волн соответственно.

При этом относительная погрешность измерения двулучепреломления при φ = 5° достигает ~ 0,75 %.

Заключение

Выполненные оценки предельных значений погрешности измерения двулучепреломления в зависимости от точности ориентации анализируемого образца относительно плоскости пропускания поляризатора позволяют сделать вывод, что допустимые отклонения образца не должны превышать ± 5° при сходимости результатов измерения не более 3 нм для разности хода менее 100 нм. Погрешность измерения зависит от измеряемой разности фаз и достигает наибольшей величины при ее значении 110…115 град.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аззам, Р.** Эллипсометрия и поляризованный свет / Р. Аззам, Н. Башара. – М. : Мир, 1981. – 583 с.

2. **Снопко, В. Н.** Поляризационные характеристики оптического излучения и методы их измерения / В. Н. Снопко. – Минск : Навука і тэхніка, 1992. – 124 с.

3. **Миндлин, Р.** Изучение напряжений методом фотоупругости / Р. Миндлин // УФН. – 1940. – Т. 23, № 1. – С. 16–66.

4. Оптические свойства кристаллов / А. Ф. Константинова [и др.].– Минск : Наука и техника. – 1995. – С. 88–94.

5. **Джеррард, А.** Введение в матричную оптику / А. Джеррард, Дж. М. Бёрч. – М. : Мир, 1978. – 336 с.

6. **Александров, А. Я.** Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела / А. Я. Александров, М. Х. Ахметзянов. – М. : Наука, 1973. – 356 с.

7. **Абен, Х. К.** Интегральная фотоупругость / Х. К. Абен. – Таллин : Валгус, 1975. – С. 95–112.

8. **Вишняков, Г. Н.** Измерение разности фаз при линейном двулучепреломлении в дифференциальном фазовом поляриметре с вращающимся анализатором / Г. Н. Вишняков, Г. Г. Левин, А. Г. Ломакин // Оптический журнал. – 2011. – Т. 78, № 9. – С. 76–81.

9. **Helen, S. S.** Achromatic phase shifting by a rotating polarizer / S. S. Helen, M. P. Kothiyal, R. S. Sirohy // Optics Communications. – 1998. – Vol. 154, № 5–6. – P. 249–254.

10. Full-field heterodyne polariscope with an image signal processing method for principal axis and phase retardation measurements / Yu-Lung Lo [et al.] // Applied Optics. – 2006. – Vol. 45, № 31. – P. 8006 –8012.

11. **А. с. 114315 СССР, МКИ 21/23.** Способ измерения величин двойного лучепреломления полимерных материалов / Г. М. Айрапетянц, А. Г. Старовойтов (СССР). – № 3606590 ; заявл. 05.10.83 ; опубл. 23.02.85, Бюл. № 7. – 3 с.

Статья сдана в редакцию 22 июня 2016 года

Анатолий Григорьевич Старовойтов, канд. физ.-мат. наук, доц., Белорусско-Российский университет. E-mail: physics@bru.by.
Андрей Николаевич Василенко, ассистент, Белорусско-Российский университет. E-mail: physics@bru.by.
Александр Васильевич Хомченко, д-р физ.-мат. наук, Белорусско-Российский университет. E-mail: avkh@mogilev.by.
Ирина Анатольевна Черкасова, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет. E-mail: physics@bru.by.

Anatoly Grigoryevich Starovoytov, PhD (Physics & Mathematics), Associate Prof., Belarusian-Russian University. E-mail: physics@bru.by.
Andrey Nikolayevich Vasilenko, assistant lecturer, Belarusian-Russian University. E-mail: physics@bru.by.
Alexander Vasilyevich Khomchenko, DSc (Physics & Mathematics), Belarusian-Russian University. E-mail: avkh@mogilev.by.
Irina Anatolyevna Cherkasova, senior lecturer, Belarusian-Russian University. E-mail: physics@bru.by

УДК 621.3.002.5:64:658.382.3:006.354

А. В. Хомченко

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРООБОГРЕВАЕМЫХ СТЕКЛОПАКЕТОВ

UDC 621.3.002.5:64:658.382.3:006.354

A. V. Khomchenko

INVESTIGATION OF PROPERTIES OF ELECTRICALLY HEATED DOUBLE GLAZING WINDOWS

Аннотация

Представлены методика и результаты исследования свойств опытных образцов электрообогреваемых стеклопакетов. Показано, что использование закаленных стекол с низкоэмиссионными покрытиями в качестве электрообогревателя позволяет обеспечить заданную температуру на внутренней поверхности стеклопакета. Выполнен анализ тепловых полей в плоскости стекла. Продемонстрирована возможность измерения характеристик термоупругих состояний, возникающих в процессе нагрева стеклопакета.

Ключевые слова:

электрообогреваемые стеклопакеты, метод измерения, ток утечки, сопротивление и мощность нагревателя, температурные поля, термонапряжения.

Abstract

The methods and the results of the investigation of properties of pilot samples of electrically heated double glazing windows are presented. It is shown that the use of tempered glass with a low-emissivity coating used as an electric heater allows having the target temperature on the inner surface of the glazing. The analysis of thermal fields in the plane of glass has been performed. The possibility of measuring the characteristics of thermoelastic states occurring during heating of a double glazing window is shown.

Key words:

electrically heated double glazing windows, measurement method, leakage current, heater resistance and capacity, temperature fields, thermal stresses.

Введение

Обеспечение эффективной теплоизоляции элементов остекления зданий и салона транспортных средств является одной из актуальных задач. Для уменьшения тепловых потерь, обусловленных процессами теплопроводности и конвекции, обычно применяют двойное остекление, что в целом дает лишь незначительный эффект, т. к. основные потери тепла вызваны переносом энергии в результате теплового излучения. Определенное снижение потерь достигается путем использования так называемых энергосберегающих стекол [1–4], особые свойства которых связаны с нанесением на их поверхность низкоэмиссионных оптических покрытий. Такие покрытия обеспечивают прохождение коротковолнового солнечного излучения внутрь помещения, но препятствуют выходу из него инфракрасного излучения, например, от отопительных приборов. Применение стеклопакетов на основе стекол с низкоэмиссионными покрытиями гарантирует определенный уровень теплозащиты [5]. Однако даже самые эффективные стеклопакеты пол-

© Хомченко А. В., 2016

ностью не решают проблему выравнивания температуры стекла и помещения и получения комфортных условий в зоне окна. В связи с этим созданы электрообогреваемые стеклопакеты на основе стекол с нанесенным электропроводящим покрытием, нагреваемым при пропускании по нему электрического тока [6]. Технология производства электрообогреваемых стеклопакетов имеет ряд особенностей, недостаточно изложена в специальной литературе и является ноу-хау их производителей. Поэтому разработка и изготовление необходимых технологического оборудования и средств контроля параметров электрообогреваемых стеклопакетов весьма актуальны. При этом для разработки конструкций на основе энергоэффективного поверхностно-распределенного способа обогрева с использованием тонкопленочных обогревателей требуется выполнение комплексных исследований их электро- и теплофизических характеристик с целью определения оптимальных параметров конструкции. Для проведения электрических испытаний обогреваемых стеклопакетов целесообразно разработать методы их испытания, т. к. стандартных методик не существует.

Электрообогреваемые стеклопакеты и анализ их характеристик

Нагреватель электрообогреваемых стекол представляет собой сетку проводящих электродов, которая наносится методом шелкографии с применением серебряной пасты и нередко используется в автомобилестроении [6], или прозрачное электропроводящее покрытие, наносимое на стекло [2, 7]. В качестве такого покрытия можно использовать уже упоминаемые низкоэмиссионные покрытия [6], которые наносят в процессе производства стекла, что позволяет резко повысить их качество. Выпускаемые стекла с серийными низкоэмиссионными покрытиями имеют значения удельного поверхностного сопротивления в диапазоне от 5 до 300 Ом/см^2; стекла *I*-типа – 4…10 Ом/см^2 и наилучшим образом подходят для изготовления электрообогреваемых изделий, однако их применение возможно лишь в ламинированных конструкциях из-за низкой механической и коррозионной стойкости материала покрытия [1]. Стекла с покрытиями *K*-типа имеют близкие значения поверхностного сопротивления в диапазоне от 90 до 100 Ом/см^2, что также удовлетворяет требованиям, предъявляемым к электрообогреваемому стеклу. Для нанесения таких покрытий на практике широко используются аэрозольный и парофазный методы химического осаждения, а также вакуумный метод магнетронного напыления покрытий на основе In_2O_3 (Sn) и ZnO (Al, In-легирующие добавки) или многослойных структур «диэлектрик – металл – диэлектрик» [5, 6]. Проводящее покрытие на стекле практически не снижает его коэффициент светопропускания.

Электрически нагреваемое стекло может использоваться как в стеклопакетах, так и в составе триплекса, выполняющего функцию защитного остекления. Технологический процесс производства стеклопакетов с электрообогревом практически не отличается от производства обычных стеклопакетов. Основное различие между ними заключается в наличии системы электропитания и, при необходимости, контроля температуры. Температурный датчик позволяет контролировать температуру обогреваемого стекла и исключить возможность перегрева изделия.

Электрообогреваемые стеклопакеты с удельной электрической мощностью от 500 до 2000 Вт/м^2 способны разогреть стекло до температуры 150 °С, поэтому они выполнены из закаленного стекла [8], иначе температурные перепады, возникающие в процессе работы тонкопленочного обогревателя, могут разрушить стекло. Для отожженного стекла вероятность разрушения появляется уже при перепаде темпера-

тур, равном 50 ºС. Закаленное стекло представляет собой стекло, подвергнутое специальной термической обработке – закалке, в результате которой в объеме стекла возникают закономерно распределенные внутренние напряжения, повышающие механическую прочность стекла и обеспечивающие особый (безопасный) характер его разрушения. При степени закалки, достигаемой в промышленных условиях, предел прочности стекла при изгибе составляет 250 МПа, т. е. более чем в 5 раз выше, чем у обычного листового стекла. При этом упругость закаленного стекла, характеризуемая стрелой прогиба, возрастает в 4…5 раз. При горизонтальном способе закалки стекла на твердых опорах листы стекла подаются на горизонтальный роликовый конвейер и направляются в печь, где они нагреваются асимметрично: сверху более интенсивно, чем снизу. Вследствие образующейся разницы температур по толщине стекла возникает его температурная деформация – стекло изгибается выпуклостью вверх, не касаясь своей поверхностью валков роликового конвейера. Охлаждение листов в обдувочном устройстве также ассиметрично: оно более интенсивно сверху. В результате этого листы стекла вновь приобретают плоскую форму. Температура закалки плоского стекла составляет 630…670 ºС, продолжительность нагревания (на 1 мм толщины стекла) – 35…40 с. Оптические свойства стекла (коэффициент направленного пропускания света, светостойкость), а также его теплофизические эксплуатационные свойства, такие как теплостойкость и морозостойкость, после закаливания практически не изменяются. Закаленное стекло характеризуется стабильностью свойств при длительной эксплуатации в обычных условиях (от минус 60 до плюс 150 ºС).

Механические свойства и термостойкость закаленного стекла зависят от степени закалки. В связи с этим большое значение при его производстве приобретает правильный выбор условий термической обработки (нагрева и охлаждения), параметрами которой являются скорость нагрева стекла, максимальная температура нагрева (температура закалки), интенсивность и равномерность охлаждения. Недостаточный нагрев стекла вызывает его разрушение при закалке, слишком длительный нагрев – деформацию изделия. Интенсивность охлаждения, зависящая от толщины стекла и коэффициента теплоотдачи, играет немаловажную роль в процессе закалки. Увеличения интенсивности теплоотдачи (охлаждения) стекла достигают выбором закалочных сред и способа охлаждения. Наиболее распространенной средой при производстве закаленных стекол является воздух: закалку стекла осуществляют с помощью обдувочных решеток, подающих сжатый воздух перпендикулярно к поверхности листа через многочисленные отверстия (сопла) круглого или щелевого типа. Наряду со скоростью охлаждения, большое значение при производстве закаленных стекол приобретает равномерность их охлаждения. Неравномерное охлаждение снижает качество стекла и выход годной продукции, вызывая деформацию и разрушение стекол, образование так называемых «закалочных пятен», оптические искажения, снижает стабильность механических свойств стекол и т. д. (рис. 1).

Высокая мощность, потребляемая электрообогреваемыми конструкциями остекления, определяет соответствующие требования к качеству нанесения токопроводящих шин. Контактные шины (электроды) находятся внутри пакета, доступ к ним невозможен без разрушения изделия, т. к. обогреваемый стеклопакет содержит не менее двух пластин стекла, расположенных на расстоянии друг от друга и соединенных по периметру швом герметизации, а прозрачное токопроводящее покрытие нанесено на внутреннюю поверхность по крайней мере одного стекла.

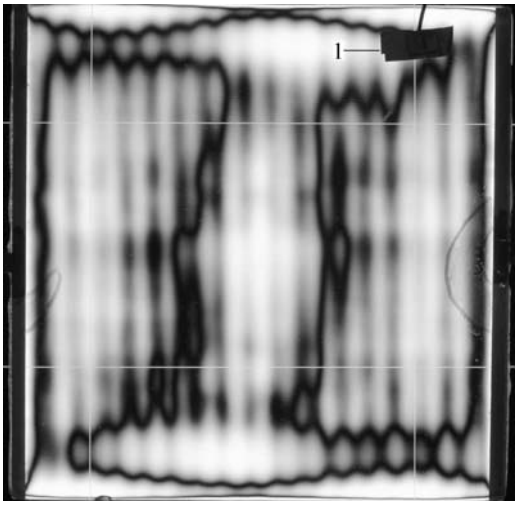


Рис. 1. Иллюстрация напряженных состояний, возникающих в стеклопакетах

На токопроводящем покрытии на двух противоположных сторонах стекла в зоне шва герметизации или около него расположено по одному проводнику с выводами для подсоединения электрического питания. При этом сопротивление проводников $R_{пр}$ выбирается в соответствии с условием [9]

$$R_{пр} < R_{покр} / 100, \qquad (1)$$

где $R_{покр}$ − сопротивление токопроводящего покрытия между проводниками.

При прохождении электрического тока через прозрачный электропроводящий слой выделяется тепловая энергия в инфракрасном диапазоне спектра излучения, на который приходится до 95 % выделяемой тепловой энергии во всем электрообогревателе. При этом существенен учет напряженно-деформированного состояния нагреваемого стекла с токопроводящим слоем. Пример расчета напряженно-деформированного состояния нагреваемых стекол приведен в [10]. Анализ [11] показывает, что уровень растягивающих напряжений в реальном диапазоне перепада температур значительно ниже прочности стекла, а следовательно, напряжения, обусловленные неравномерностью температуры по толщине стекла, не могут служить основной причиной его разрушения. В то же время этот уровень напряжений нужно учитывать при их суммировании с напряжениями от неравномерности температурного поля по площади стекла. Выполненные оценки показывают, что максимальные растягивающие напряжения возникают на свободных кромках стекла и достигают значений, сравнимых с прочностью стекла, что может привести к разрушению нагреваемого стекла. Анализ напряженно-деформированного состояния нагреваемого стекла с токопроводящим покрытием позволяет определить максимальную температуру нагрева стекла и соответствующий ей предельно допустимый перепад температур между центральной зоной и опорной кромкой стекла, при котором уровень действующих напряжений является безопасным и не вызывает разрушения стекла.

При проведении исследований электро- и теплофизических характеристик стеклопакетов были выполнены измерения токов утечки, мощности стеклопакетов при рабочей температуре и сопротивления токопроводящих дорожек.

Токи утечки измерялись с помощью схемы, изображенной на рис. 2, между любым полюсом источника питания, соединенным с доступной металлической частью, и металлическим

электродом 3 площадью не более 20 × 10 см, накладываемым на стеклопакет и соединенным с другим полюсом источника питания.

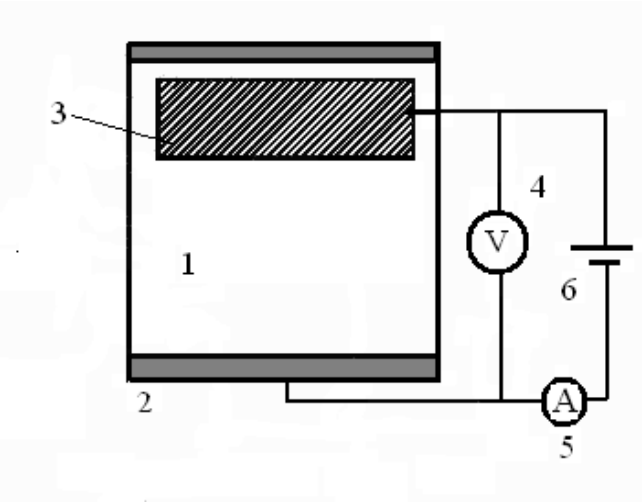


Рис. 2. Принципиальная схема установки для измерения токов утечки

Измерение токов утечки проводилось в соответствии с [12, п. 16], измерение токов утечки при рабочей температуре – [12, п. 13]. При этом ток утечки при рабочей температуре между любым полюсом источника питания и доступными металлическими частями электрообогреваемого стеклопакета не должен превышать 5 мА.

Мощность стеклопакетов при рабочей температуре измерялась методом сопротивления с помощью ваттметра или вольтметра и амперметра. Испытания проводились на специальном стенде, обеспечивающем температуру, соответствующую реальным условиям эксплуатации, в соответствии с [13, п. 10]. Мощность P, потребляемая электрообогреваемым стеклопакетом при номинальном напряжении и номинальной рабочей температуре, может отличаться от номинальной потребляемой мощности $P_{ном}$ не более чем

$$0{,}9\ P_{ном} < P < 1{,}05\ P_{ном}.$$

Для визуализации тепловых полей, а следовательно, распределения линий тока в нагревателе использовалась тепловизионная камера EasIR^{TM}-4, которая позволяла оценить распределение температуры вдоль поверхности стеклопакета. Температура стекла контролировалась также с помощью термопары 1, закрепленной на поверхности стекла (см. рис. 1).

Сопротивление токопроводящих дорожек постоянному току измерено методом вольтметра–амперметра (допустимо сравнение с падением напряжения на резисторе, сопротивление которого известно) или при помощи моста [13]. Измерения длительностью до 60 с допускается проводить при значениях постоянного тока до I = 0,1 $I_{ном}$, где $I_{ном}$ – номинальный ток нагрузки. При этом сопротивление токопроводящих дорожек в соответствии с выражением (1) не должно превышать величину 0,01 $R_{покр}$.

Результаты исследований показали, что использование низкоэмиссионного покрытия на стекле в качестве электрообогревателя позволяет поддерживать заданную температуру внутри стеклопакета (рис. 3).

а) б)

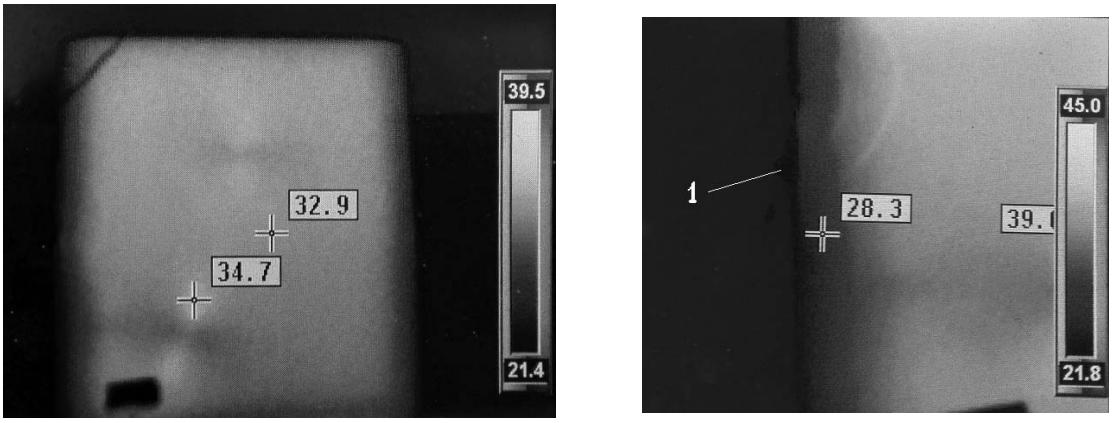


Рис. 3. Распределение температуры вдоль поверхности стеклопакета, иллюстрирующее распределение линий тока (а) и тепловые поля вблизи площадки электрического контакта (б)

Оценки электрического сопротивления прозрачного резистора составляли для различных образцов стеклопакета от 3…5 до 0,4…0,5 Ом на сантиметр его длины. Сопротивление 0,5 Ом/см для образца стеклопакета размером 30 × 30 см обеспечивает рассеиваемую мощность порядка 5 Вт/дм^2. Ток утечки при рабочей температуре электрообогреваемого стеклопакета не превышал 1 мкА.

С целью эффективного проектирования необходимо установить в явном виде зависимость электрической проводимости от геометрических и эксплуатационных параметров электрообогревателей. Для этого был применен метод непосредственного определения проводимости нанесенного покрытия с помощью мегаомметра 3 (вставка на рис. 4), где на стекло 1 с нанесенным проводящим покрытием устанавливались измерительные зонды 2, один из которых неподвижен, а второй перемещается в X-направлении, что позволило получить зависимости значений электрической проводимости в широком диапазоне изменения геометрических параметров системы.

а) б)

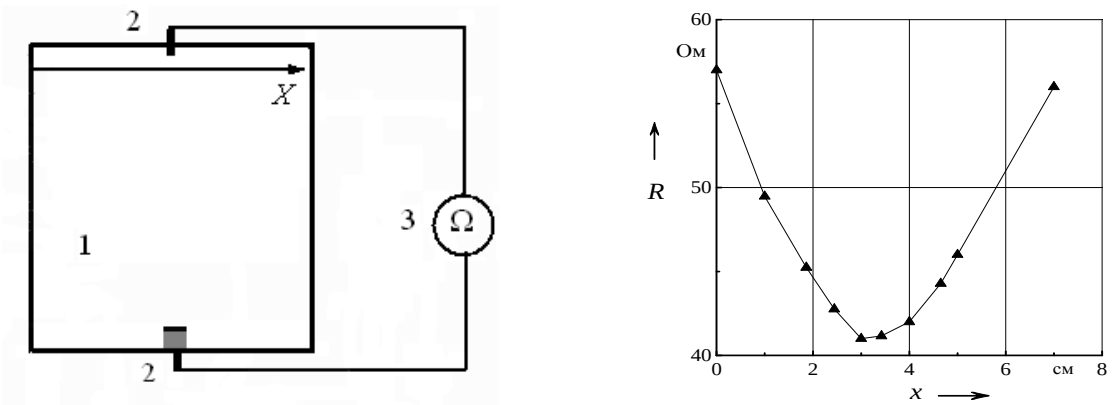


Рис. 4. Схема измерения сопротивления R проводящего покрытия (а) и его распределение вдоль направления X (б)

Наблюдаемое неоднородное распределение сопротивления слоя вдоль поверхности низкоэмиссионного покрытия (см. рис. 4) обуславливает некоторую неоднородность тепловых полей (см. рис. 3), что устраняется подбором сопротивления токопроводящей шины $R_ш = 0{,}12$ Ом ($R_ш < 0{,}01\ R_{покр}$). При прохождении электрического тока через проводящий слой выделяется тепловая энергия, что приводит к возникновению термонапряженного состояния нагреваемого стеклопакета (рис. 5).

Из анализа результатов следует, что максимальные дополнительные напряжения, возникающие при нагреве поверхности стеклопакета, не превышали 20 МПа, т. е. не достигали значений, сравнимых с прочностью стекла (см. рис. 5). Таким образом, анализ свойств нагреваемого стекла с токопроводящим слоем позволяет определить максимальную температуру нагрева стекла, при которой действующие напряжения не могут привести к разрушению электрообогреваемого стекла.

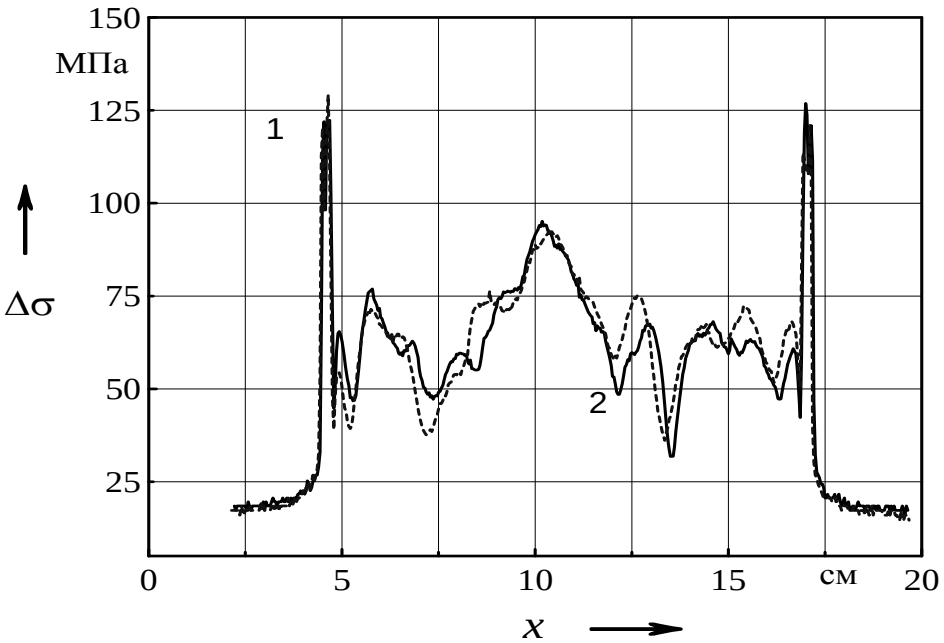


Рис. 5. Распределение механических напряжений вдоль поверхности стеклопакета при различной его температуре: кривая 1 – 25 °С; кривая 2 – 50 °С

Заключение

Результаты исследования свойств электрообогреваемых автомобильных стеклопакетов показали, что использование закаленных стекол с низкоэмиссионными покрытиями в качестве электрообогревателя позволяет обеспечить заданную температуру на внутренней поверхности стеклопакета и, соответственно, условия для наблюдения за дорогой при плохой метеообстановке. Низкотемпературный поверхностно-распределенный локальный электрообогрев является энергоэффективным и экономичным видом обогрева. Кроме того, такие обогреватели отвечают требованиям электробезопасности, надежности и обладают необходимыми физико-механическими и электрофизическими свойствами.

Принятые технические решения при разработке макета электрообогреваемых автомобильных стеклопакетов показали достаточную функциональность

их элементов и эффективность электрообогрева. Дальнейшие исследования должны быть направлены на совершенствование конструкции системы питания, нагревательного элемента и системы электропроводящих шин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Glaser, H. J.** Geschichte der Entwicklung und industriellen Produktion von Warmedammschichten auf Flachglas / H. J. Glaser // Galvanotechnik. – 2007. – Vol. 98, № 6. – P. 1490–1500.

2. Свойства низкоэмиссионных покрытий на основе Ag и Cu, нанесенных на полимерную пленку методом магнетронного распыления / Н. Захаров [и др.] // Перспективные материалы – 2012. – № 2. – С. 62–70.

3. **Glaser H. J.** Low-emissive coatings on the outer surface of heat-insulating glasses – a challenge to the flat glass industry / H. J. Glaser // Glass Sci. and Technol. – 2002. – Vol. 75, №1. – P. 12–19.

4. **Смирнов, М. И.** Стекло и энергосбережение: тенденции в международном техническом регулировании / М. И. Смирнов // Энергосбережение. – 2012. – № 1. – С. 72–75.

5. Полимерная пленка с низкоэмиссионным покрытием для снижения тепловых потерь через светопрозрачные конструкции / С. В. Работкин [и др.] // Изв. вузов. Физика. – 2011. – Т. 54, № 11. – Ч. 2. – С. 169–175.

6. **Геранчева, О. Е.** Возможности использования рефлектных и низкоэмиссионных стекол в качестве токообогреваемых / О. Е. Геранчева, А. А. Чистяков, Р. Р. Суркин // Стекло мира. – 2007. – № 1. – С. 95–98.

7. **Махин, А. В.** Остекление салона автомобиля / А. В. Махин, О. Э. Еремеева // Стекло мира. – 2011. – № 8. – С. 77–80.

8. **Schneider, F.** New developments in multifunctional IGUs / F. Schneider, O. M. Hubler // 10 International Conference on Architectural and Automotive Glass, Tampere, 15–17 June, 2007 : Conference Proceedings. – Tampere : Tamglass. 2007. – P. 528–531.

9. **Пат. 2165513 РФ, МКИ Е 06, В 3/66.** Стеклоблок для окон / А. Н. Ивлюшкин, В. А. Могутов, В. Г. Самородов, А. В. Спиридонов. – № 99121421/03 ; заявл.12.10.99 ; опубл. 20.04.01. – 6 с.

10. Анализ напряженно-деформированного состояния нагреваемого стекла с токопроводящим слоем / В. Д. Вешуткин [и др.] // Современные технологии в кораблестроительном и энергетическом образовании, науке и производстве : материалы Всероссийской науч.-техн. конф. – Н. Новгород, 2006. – С. 470–471.

11. **Хомченко, А.В.** Исследование характеристик электрообогреваемых стеклопакетов / А. В. Хомченко, А. Н. Василенко, С. О. Парашков // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев, 2016. – С. 284–285.

12. **ГОСТ Р 52161.1-2004.** Безопасность бытовых и аналогичных электрических приборов. – М. : Изд-во стандартов, 2004. – 103 с.

13. **ГОСТ 21342.20-78.** Резисторы. Метод измерения сопротивления. – М. : Изд-во стандартов, 1999. – 10 с.

Статья сдана в редакцию 22 июня 2016 года

Александр Васильевич Хомченко, д-р физ.-мат. наук, Белорусско-Российский университет. E-mail: avkh@mogilev.by.

Alexander Vasilyevich Khomchenko, DSc (Physics & Mathematics), Belarusian-Russian University. E-mail: avkh@mogilev.by.

СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

УДК 624.012.35

А. П. Борисюк, Ю. Ю. Зятюк

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФИБРОБЕТОНА СО СТАЛЬНОЙ ФИБРОЙ

UDC 624.012.35

A. P. Borysyuk, Y. Y. Ziatyuk

RESEARCH ON DEFORMATION CHARACTERISTICS OF FIBER CONCRETE WITH STEEL FIBER

Аннотация

Даны характеристики видов волокон, которые используются для изготовления фибробетона. Рассмотрены результаты экспериментальных исследований стальной фибры для дисперсного армирования бетонов. Приведены экспериментальные исследования сталефибробетонных образцов.

Ключевые слова:

фибробетон, сталефибробетон, стальная фибра, характер деформирования, пластификаторы, добавки, неупругие деформации.

Abstract

The characteristics of types of fibers used for manufacturing fiber-reinforced concrete are given in the paper. The results of the research on steel fiber used in disperse-reinforced concrete are considered. The experimental studies of steel fiber concrete samples are presented.

Key words:

fibrous concrete, steel fiber concrete, steel fiber, nature of deformation, plasticizers, additives, inelastic deformation.

Введение

Для успешного развития строительного производства принципиальны применение в строительстве эффективных строительных конструкций и материалов, разработка и внедрение новых технологий использования в строительных конструкциях, изделиях и материалах отходов металлургической, горнодобывающей промышленности, сертификация строительных материалов, изделий и конструкций.

Строительная отрасль базируется на использовании современных технологий и материалов, которые должны удовлетворять нормам стандартизации [1]. Для решения этих вопросов были разработаны и разрабатываются бетоны, которые владеют высокими эксплуатационными характеристиками, а именно дисперсно-армированные бетоны [2].

Примечание – Исследования проводились с использованием стальной фибры, производимой на ООО «БудМат», типа «челябинка» ТУ 0991-123-53832025-2001 (по данным поставщика).

© Борисюк А. П., Зятюк Ю. Ю., 2016

Существующее состояние вопроса

Фибробетон – мелкозернистая разновидность бетона с добавлением фибры. Применяется фибра синтетическая, стеклянная и стальная из волокон длиной от 5 до 150 мм и диаметром от 0,2 до 1,0 мм [3].

Исследования с использованием фибробетона проводили А. Б. Голишев, Б. А. Боярчук, Е. М. Бабич, Л. Й. Дворкин, А. Касассбех, А. С. Кричевский, Г. В. Гетун, А. Я. Барашиков, О. П. Сунак, О. И. Валовой, Ф. Н. Рабинович, К. В. Талантова, С. В. Клюев, С. Д. Семенюк, В. В. Билозир, Г. К. Хайдуков и др.

Фибробетон состоит из двух материалов и имеет свойства, которых нет у исходных материалов, т. е. это цементно-бетонная матрица. В фибробетоне растягивающие напряжения принимают на себя волокна фибры (табл. 1). Фиброволокно усиливает углы и торцы бетонных конструкций, в начале отвердевания бетона снижает усадку и образование трещин, при снятии опалубки нивелирует вероятность повреждения [4].

Табл. 1. Характеристики видов волокон, которые используют для изготовления фибробетона

Волокно	Плотность, г/см^3	Модуль упругости, МПа	Прочность при растяжении, МПа	Удлинение при растяжении, %
Полипропилен	0,9	3500…8000	400…700	10…25
Полиамид	0,9	1900…2000	720…750	24…25
Полиэтиленовое	0,95	1400…4200	600…720	10…12
Акриловое	1,1	2100…2150	210...420	25…45
Нейлоновое	1,1	4200…4500	770…840	16…20
Вискозное сверхпрочное	1,2	5600…5800	660…700	14…16
Полиэфирное	1,4	8400…8600	730…780	11…13
Хлопковое	1,5	4900…5100	420…700	3…10
Карбоновое	1,63	280 000…380 000	1200…4000	2,0…2,2
Углеродное	2,00	200 000…250 000	2000…3500	1,0…1,6
Стеклянное	2,60	7000…8000	1800…3850	1,5…3,5
Асбестовое	2,60	68 000…70 000	910…3100	0,6…0,7
Базальтовое	2,60…2,70	7000…11 000	1600…3200	1,4…3,6
Стальное	7,80	190 000…210 000	600…3150	3…4

Ценность стальных волокон не только в повышении физико-механических свойств и в технологии изготовления конструкций. Армирование происходит непосредственно в бетономешалках, автомиксерах на строительной площадке. Время изготовления сокращается практически вдвое, снижается материалоемкость, уменьшается вес зданий и сооружений [5].

Сталефибробетон – композиционный материал из бетонной матрицы, армированный короткими стальными волокнами – фибрами диаметром d_f = 0,25…1,2 мм, с отношением длины к диаметру l_f / d_f = 50…120 и объемным содержанием d в пределах 0,5…3 % [6].

Для производства фибробетона с наилучшими характеристиками необходимо добиться технологической совместимости бетона-матрицы и фибры, максимальной заанкерированности фибры

в бетоне. Категорически не допускается попадания фибры комками, она должна быть очень тщательно перемешана [7]. Допускается использование различных пластификаторов и добавок, но в случае металлической фибры – это необязательная рекомендация. Одним из основных факторов, влияющих на ход исследования, является точность: точность при дозировании, при выполнении технологических перерывов и догрузок [8].

Важный параметр для фибры – отношение ее длины к диаметру – l_f/d_f, которое обеспечивает эффективную работу фибры в бетоне и хорошее сцепление. С увеличением этого отношения ухудшаются условия перемешивания стальной фибры в бетономешалке. Желательным является отношение, равное 80:100 [9].

Полипропиленовые волокна характеризуются значительными деформациями даже при небольших нагрузках растяжения, что объясняется низкой адгезией полипропилена в цементной матрице. Также волокно имеет высокую истираемость поверхности и горючесть при воздействии открытого пламени. Основными недостатками металлических волокон являются катодный эффект и нестойкость к агрессивной среде цементных растворов. Базальтовая фибра под действием агрессивной цементной среды реагирует с получением новообразований. Наблюдается частичное разрушение волокна, величина которого зависит от времени (табл. 2). В среднем разрушение происходит на глубину до 4 мкм [9].

Табл. 2. Физико-механические характеристики цемента марок ПЦ-И-500 и Пц-ии/а-ш-500

Название показателя	Согласно ДСТУ Б.В.2.7-6:2010	Средний показатель	
		ПЦ-И -500	Пц-ии/а-ш-500
Тонкость помола, остаток на сите № 008, %	<15,0	6,0…10,0	6,0…9,0
Удельная поверхность за Блейном, $м^2$/кг	–	250…360	240…280
Нормальная густота цементного теста, %	–	26,5	27,5
Сроки твердения: начало, мин конец, ч	 > 60 < 10	 90…150 4,5…5	 90…120 5…6
Прочность в возрасте 2 сут, МПа: изгиб сжатие	 – > 15	 3,2…4,2 18,0…25,0	 3,0…4,2 15,0…25,0
Прочность в возрасте 28 сут, МПа: изгиб сжатие	 – > 50	 6,0…6,8 50,0…55,0	 5,5…6,6 50,0…52,5
Равномерность изменения объема, мм	< 10	5	5
Содержание добавки гипса в пересчете на SO3, %	3,5	3,1	3,3

Сравнивая металлическую и другие фибры, нельзя делать однозначного вывода о преимуществах одной фибры над другой. К этому вопросу нужно подходить комплексно, в зависимости от среды, типа нагрузки и т. п. Немаловажное значение имеет цена, а здесь самой дешевой является металлическая фибра. Возникает необходимость исследования бетонных изделий, армированных стальной фиброй, резаной из оцинкованного листа, которая к тому же лишена нестойкости к агрессивной среде за счет своего покрытия.

Материалы для проведения исследований

Материалами для проведения исследований выступали: товарный портландцемент Здолбунивского ПАТ «Волынь-цемент»; песок из месторождений Славутского р-на Хмельницкой обл.; гранитный щебень фракции 5…20 мм Выровского карьера Ровенской обл.; фибра, резаная из листа, d_f = 0,5 мм, l_f = 30 мм.

В качестве *мелкого заполнителя* в растворах и бетонах использовали: кварцевый песок мелкий и средней крупности месторождений Славутского р-на Хмельницкой обл.; в бетонных смесях – крупный заполнитель – гранитный щебень фракции 5…20 мм Выровского карьера Ровенской обл. Характеристики заполнителей представлены в табл. 3.

Табл. 3. Характеристика заполнителей

Показатель	Песок П1	Песок П2	Щебень
Модуль крупности	1,87	2,11	–
Фракция, мм	–	–	5…20
Наибольшая крупность зерен, мм	1,25	2,5	20
Полный остаток на сите № 0,63, %	27	37	–
Водопотребность, %	8,8	6,6	3,1
Содержание пылевидных и глинистых частиц, %	2,4	1,7	–
Действительная плотность, кг/м^3	2650	2690	2570
Насыпная плотность, кг/м^3	1420	1380	1450
Пустотность, %	46,4	48,7	43,5

Существенных включений в песках органических, серистых и сернокислых примесей, аморфного кремнезема не обнаружено. Зерновой состав песка находился в диапазоне, который отвечает требованиям ДСТУ (государственных стандартов Украины).

В качестве *основного заполнителя* бетона был использован отсев измельчения гранита на щебень Выровского карьера Ровенской обл. (табл. 4).

Табл. 4. Зерновой состав гранитного отсева Выровского карьера

Частичный остаток на ситах с размером амбарчика, мм							$М_{кр}$
5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	< 0,16	
7,2	34,7	10,5	14,2	13,6	10,9	17,8	3,02

Физические свойства отсева, отмытого от пылевидных примесей:

– насыпная плотность в сыпучем состоянии $\rho_н$ = 1,47 г/см^3;

– насыпная плотность в уплотнённом состоянии $\rho_{н'}$ = 1,87 г/см^3;

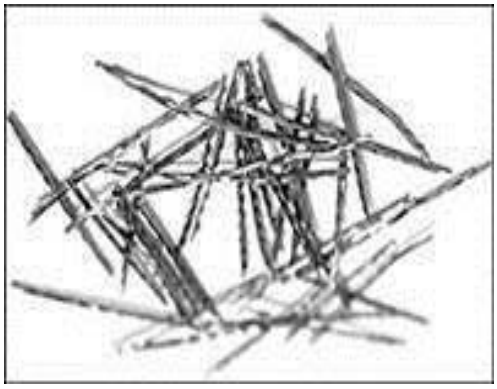
– пустотелость в сыпучем состоянии – 47,7 %;

– пустотелость в состоянии уплотнения вибропрессованием – 30,7 %.

Все исследуемые отсевы характеризовались значительным содержанием частиц < 0,16 мм (15,20 %).

Фибровые волокна. Листовую

фибру (рис. 1) получают путем резания стального листа, который сначала подвергают холодному обкатыванию. Листовая фибра способна оказывать сопротивление растяжению в пределах 510…850 МПа. Согласно технологии производства можно получить даже жаростойкую фибру из нержавеющей стали, которую используют для армирования конструкций и сооружений с высоким показателем теплостойкости.



Плотность – 7,5 г/см^3.
Диаметр волокна – 0,35…0,5 мм.
Длина волокна – 40…45 мм.
Форма – отдельные плоские волокна с волной.
Прочность на разрыв – 510…850 МПа.
Коэффициент растяжения – 8 %.
Модуль Юнга – > 10000 МПа.

Рис. 1. Фибра, резаная из листа (листовая фибра)

Тонкие волокна фибры очень удобны, они препятствуют откалыванию бетона. Это свойство листовой фибры полезно, когда бетон еще не успел затвердеть. Добившись достаточной анкеровки, можно улучшить прочность сталефибробетона на стадиях как до, так и после появления трещин (табл. 5 и 6).

Табл. 5. Состав бетона (без фибры)

Состав	Цемент, кг	Песок, кг	Щебень, кг	Вода, л
На 1 м^3	370	625	1100	210
На 60 л	22,2	37,5	66	12,6

Табл. 6. Испытание образцов (без фибры)

Марка образцов	Размер	Разрушающее усилие F, кН	Прочность на сжатие, МПа
К-1	10,3 × 10 × 10	139	13,4
К-2	10,2 × 10,2 × 10	141	13,5
К-3	10 × 10,2 × 10,2	145	14,2

Устраивание фибры в бетон. Бетономешалку загружают готовой смесью. В рассматриваемом случае поочередно загружали цемент, песок, щебень, воду и после готовности смеси добавляли фибру (табл. 7 и 8). Загрузка фибры осуществлялась в три приема через промежутки времени около 1 мин при вращающемся барабане бетономешалки. При больших объемах загрузку фибры можно проводить виброситом, пневмозагрузчиком (воздушной помпой). Интервал перемешивания сталефибробетонной смеси не должен превышать 3 мин. Это вызвано тем, что если операцию выполнять дольше, фибра может

пристать к стенкам миксера и осесть неравномерно по телу бетона. Бетонная матрица для всех образцов изготовлялась из одного состава бетона [10].

Табл. 7. Состав бетона (с фиброй)

Состав	Цемент, кг	Песок, кг	Щебень, кг	Вода, л	Фибра (3 %), кг
На 1 м³	370	625	1100	210	30
На 60 л	22,2	37,5	66	12,6	1,8

Табл. 8. Испытание образцов (с фиброй)

Марка образцов	Размер	Разрушающее усилие F, кН	Прочность на сжатие, МПа
$К_{СФБ}$-1	10,1 × 10,2 × 10	169	16,4
$К_{СФБ}$-2	10,1 × 10 × 10	164	16,2
$К_{СФБ}$-3	10,2 × 10 × 10	172	16,9

Наблюдая за характером разрушения бетонных образцов с фибровым армированием и без него, видна была закономерность, что образцы с фиброй разрушались плавнее и вязко без потери формы образца. Разрушенные образцы держат форму (рис. 2, а) и для того, чтобы рассмотреть расположение фибры, приходилось разбивать их вручную (рис. 2, б). Можно сделать вывод, что в бетоне с фиброй происходит перераспределение усилий. Фибровые волокна накапливают напряжения, а затем перераспределяют их на крупный заполнитель (рис. 3 и 4).

а) б)

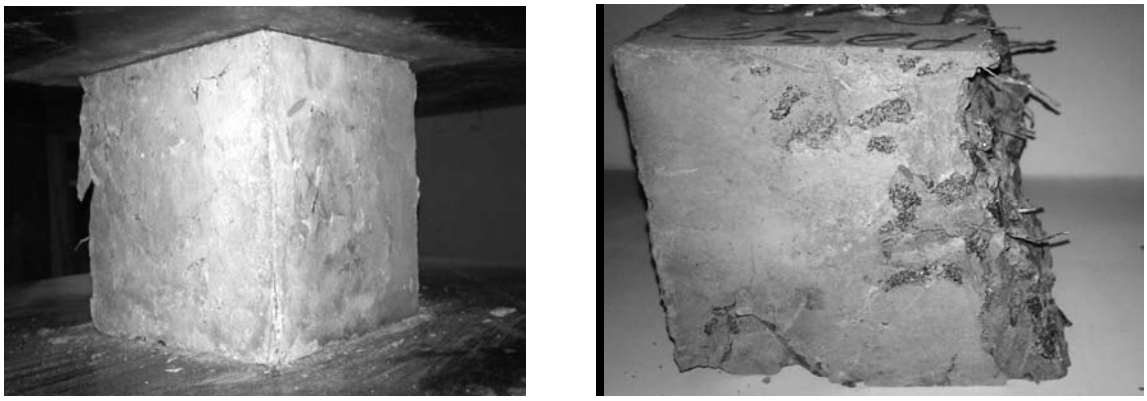


Рис. 2. Вид разрушения кубов с фиброй

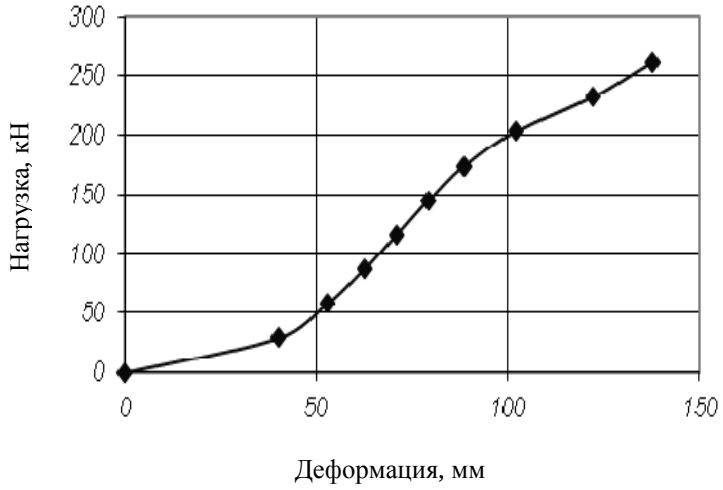


Рис. 3. Диаграмма «нагрузка – деформация» $П_{СФБ}$-2 – образец армированного фиброй бетона

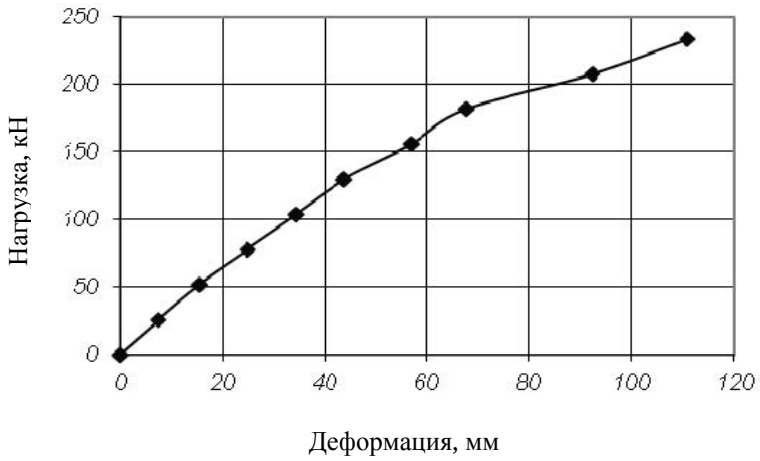


Рис. 4. Диаграмма «нагрузка – деформация» П-2 – образец неармированного бетона

Выводы

При использовании фибры достигаются более высокие показатели сопротивления бетона, чем без фибры (рис. 5 и 6). Увеличивается деформативность бетона при максимальных нагрузках.

Рис. 5. Призмы с фибровым армированием после разрушения

Рис. 6. Призма с фибровым армированием после разрушения с характерным расположением фибр в теле бетона

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сєвка, В. Г.** Послідовність розробки стратегії антикризового регулювання будівельної галузі / В. Г. Сєвка, Н. Б. Паліга // Економіка будівництва і міського господарства. – 2009. – № 1. – С. 41–50.

2. **Рабинович, Ф. Н.** Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции : монография / Ф. Н. Рабинович. – М. : АВС, 2004. – 560 с.

3. Фибробетон. Технологии будущего на службе настоящего // Федеральный строительный рынок. – СПб., 2009. – Вып. 74.

4. **Дворкін, Л. Й.** Основи бетонознавства / Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін. – Киев : Основа, 2007. – 312 с.

5. **Клюев, С. В.** Высокопрочный фибробетон для промышленного и гражданского строительства / С. В. Клюев // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 8. – С. 6–10.

6. **Талантова, К. В.** Сталефибробетон с заданными свойствами и строительные конструкции на его основе : автореф. дис. … д-ра техн. наук / К. В. Талантова. – Ростов н/Д, 2013. – 36 с.

7. **ДСТУ-Н Б В.2.6-78:2009.** Конструкції будинків і споруд. Настанова з проектування та виготовлення сталефібробетонних конструкцій. – Київ : М-во регіонального розвитку та будівництва України, 2009. – 42 с.

8. **Борисюк, О. П.** Методика експериментальних досліджень залізобетонних балок, підсилених у стиснутій і розтягнутій зоні / О. П. Борисюк, Ю. Ю. Зятюк // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. праць. – Рівне, 2013. – Вип. 27. – С. 27–33.

9. **Семенюк, С. Д.** Применение сталефибробетона для усиления сжатой зоны железобетонных балок методом наращивания / С. Д. Семенюк, Ю. Г. Болошенко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. праць. – Рівне, 2011. – Вип. 21. – С. 402–407.

10. **Новицький, А. Г.** Аспекты применения базальтовой фибры для армирования бетонов / А. Г. Новицький, М. В. Ефремов // Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка : наук.-техн. зб. – 2010. – Вип. 36. – С. 22–26.

11. **Клюев, С. В.** Экпериментальные исследования фибробетонных конструкций / С. В. Клюев // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2011. – № 4. – С. 71–74.

Статья сдана в редакцию 19 мая 2016 года

Александр Павлович Борисюк, канд. техн. наук, проф., Национальный университет водного хозяйства и природопользования. Тел.: +380-505-69-41-70.
Юрий Юрьевич Зятюк, аспирант, Национальный университет водного хозяйства и природопользования. E-mail: Zyatyuk.bomberman@yandex.ua.

Aleksandr Pavlovich Borysyuk, PhD (Engineering), Prof., National University of Water management and environmental engineering. Phone: +380-505-69-41-70.
Yury Yuriyevich Ziatyuk, PhD student, National University of Water management and environmental engineering. E-mail: Zyatyuk.bomberman@yandex.ua.

УДК 624.012

И. В. Мельник, В. М. Сорохтей, Т. В. Приставский

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОДАВЛИВАНИЯ ВЕРХНЕЙ ПОЛКИ МОНОЛИТНОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТЫ С ПУСТОТООБРАЗУЮЩИМИ ВКЛАДЫШАМИ

UDC 624.012

I. V. Melnyk, V. M. Sorokhtey, T. V. Prystavskyy

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES OF PUNCHING THE TOP SHELF OF A MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE SLAB WITH VOID FORMING INSERTS

Аннотация

Представлена методика экспериментальных и теоретических исследований верхней полки фрагментов монолитной железобетонной плиты с пустотообразующими вкладышами при загружении штампами одинакового размера. Описаны характер разрушений и результаты экспериментальных значений прочности на продавливание при разной толщине верхней неармированной полки, а также сопоставление экспериментальных значений прочности с теоретическими, рассчитанными по разным нормам и в программном комплексе «Лира». Выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния при продавливании верхней полки различной толщины в ПК «Femap».

Ключевые слова:

монолитная полая железобетонная плита, бетонная полка, продавливание.

Abstract

The paper presents the methodology of experimental and theoretical research on the top shelf of fragments of a monolithic reinforced concrete slab with void forming inserts during uploading with a stamp of the same size. It also describes the nature of destruction and the results of the experimental values of punching strength at different thicknesses of an unreinforced top shelf, and compares the experimental values of strength with the theoretical ones calculated according to various standards and with «Lira» software complex. The simulation of stress-strain state during punching of top shelves of various thicknesses has been performed in SC «Femap».

Key words:

hollow monolithic concrete slab, concrete shelf, punching.

Введение

Плоские монолитные железобетонные перекрытия все шире используют в зданиях и сооружениях различного назначения: как в каркасном, так и в индивидуальном строительстве. При средних и больших пролетах существенно увеличивается собственный вес монолитных перекрытий. Для его уменьшения целесообразно применять вкладыши из относительно легких и дешевых материалов [1, 2].

В Украине в качестве вкладышей обычно используют пенополистирол [3–5]. При этом, как правило, применяют вкладыши прямоугольных форм, позволяющих получать более рациональные геометрические параметры с относительно тонкостенными размерами верхней и нижней полок перекры-

© Мельник И. В., Сорохтей В. М., Приставский Т. В., 2016

тия. По отношению к окружающему бетону прочность и деформативность пенополистирола на порядок меньше, поэтому можно условно считать, что по отношению к железобетонной плите пенополистирольные вкладыши являются пустотами.

Несмотря на то, что использование плоских монолитных железобетонных перекрытий с вкладышами становится все чаще, исследований на возможное продавливание верхней (непосредственно принимающей нагрузку) полки не проводили.

Анализ исследований и публикаций

Исследования на продавливание бетонных и железобетонных плит имеют столетнюю историю. Среди предыдущих и последних исследований можно выделить работы А. Д. Сергиевского [6], А. Иванова [7], С. Ф. Клованича и В. И. Шеховцова [8].

Экспериментально-теоретические исследования этих и многих других авторов позволили выявить факторы, влияющие на продавливание: прочность бетона, геометрические размеры плит, размеры в плане контактной площадки (штампов) передачи нагрузки, расстояние от опор к штампу, тип штампов, наличие армирования, нагельный эффект в арматуре, форма поверхности пирамиды продавливания, последовательность и характер трещинообразования и др.

Влияние основных факторов на продавливающую силу отражено в предыдущих и действующих нормативных документах [9–11].

Цель и задачи исследований

Провести экспериментально-теоретические исследования прочности верхней полки монолитного железобетонного перекрытия с пустотообразующими вкладышами при загружении одинакового размера в плане штампами при различной и незначительной толщине полки, что может иметь место в случае отклонения положения вкладышей по высоте сечения плиты и других технологических факторов при выполнении работ по устройству монолитного перекрытия с вкладышами.

Методика и результаты экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводили на опытном железобетонном плитном образце общими размерами 26 × 53 × 122 см, который представлял собой фрагмент перекрытия с поперечным расположением вкладышей сечением 16 × 16 см.

Опытные образцы армировались только в нижней зоне.

После тепловой обработки пенополистирольные вкладыши изъяли, образовав пустоты.

Фактическая прочность бетона по результатам испытаний контрольных образцов составляла 19,1…20,9 МПа, модуль упругости – $32{,}1 \cdot 10^3$ МПа.

Верхнюю полку над каждой пустотой порезали в поперечном направлении на пять частей.

Испытания верхней полки на продавливание проводили с использованием верхней и нижней плит гидравлического пресса П-125 (рис. 1, а).

Металлическую пластину (штамп) размерами в плане 3 × 5 см выставляли на цементно-песчаном растворе марки М100 для выравнивания контактных плоскостей с полкой плиты. При испытании каждой полки к боковым граням соседних ребер устанавливали швеллера № 14 на растворе М100, которые крепили между собой тяжами для восприятия горизонтального распора, возникающего при загружении (рис. 1, б).

Всего было испытано 30 фрагментов верхней бетонной полки. В зависимости от характера разрушения их можно сгруппировать по четырем типам.

Тип разрушения I. Разрушение полки на площади более 70 %, но не по

всей ширине (рис. 2). Наблюдается образование трещины с двух сторон возле ребер плиты.

а) б)

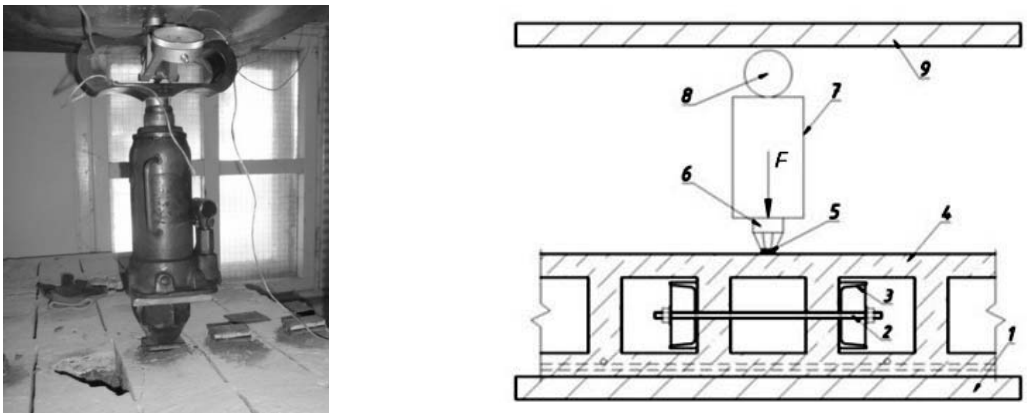


Рис. 1. Общий вид пресса П-125 (а) и схема испытания (б) верхних полок фрагмента плиты на продавливание: 1 – нижняя плита пресса; 2 – тяж; 3 – швеллер № 14; 4 – опытный образец; 5 – металлическая пластина (штамп); 6 – конусный металлический элемент; 7 – гидравлический домкрат; 8 – динамометр; 9 – верхняя плита пресса

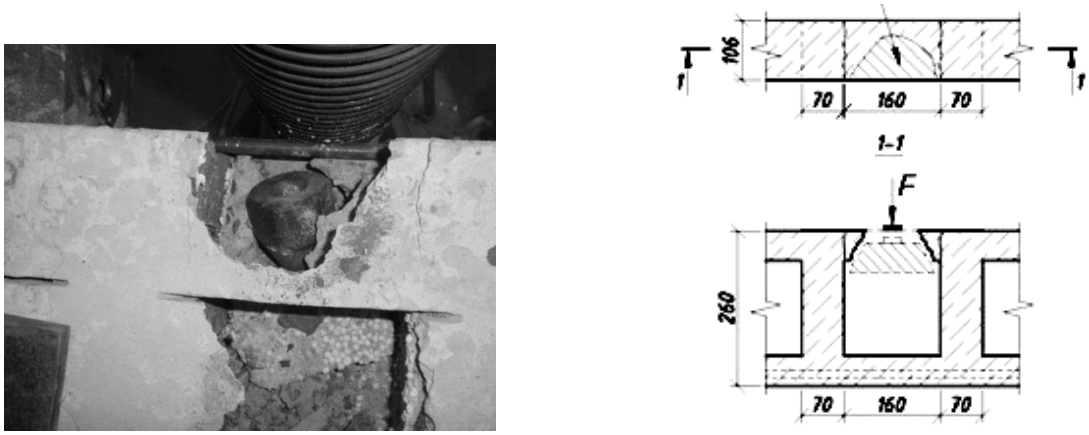


Рис. 2. Характер и схема разрушения полки типа I

Тип разрушения II. Трещины образуются возле ребра Р1, срез – со стороны ребра Р2 (рис. 3). Площадь зоны разрушения составляет около 75 %.

Тип разрушения III. Разрушенная площадь полки составляет 50…70 %. Срез – со стороны одного из ребер. В отличие от схемы разрушения II очертание в плане краев разрушенной части полки является почти прямоугольным (рис. 4).

Тип разрушения IV. Полка разрушилась по «классической» схеме продавливания в виде пирамиды (рис. 5), боковые грани которой наклонены под углом примерно 45…47° к ее основанию.

Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 6, на котором представлены значения продавливающей разрушающей нагрузки F в зависимости от толщины полки t и график, отражающий характер этой зависимости.

Более подробно методика и результаты экспериментальных исследований изложены в [12].

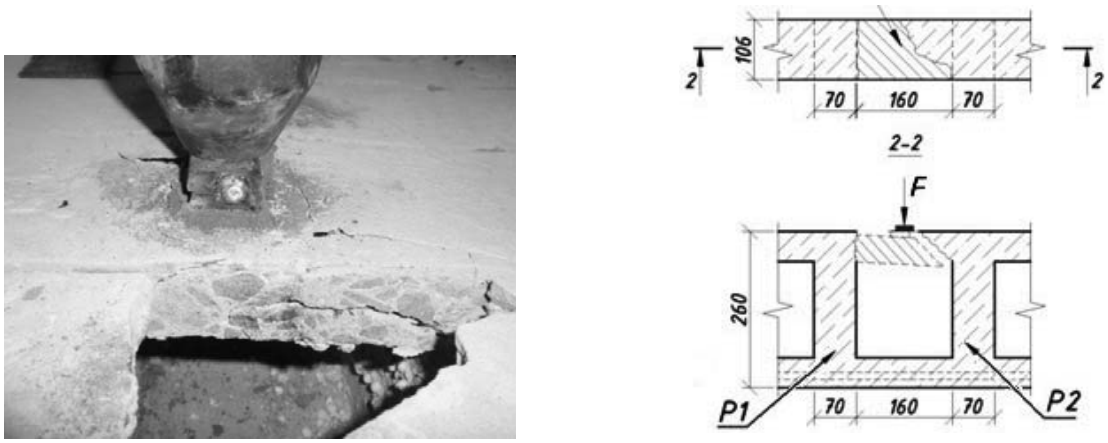


Рис. 3. Характер и схема разрушения полки типа II

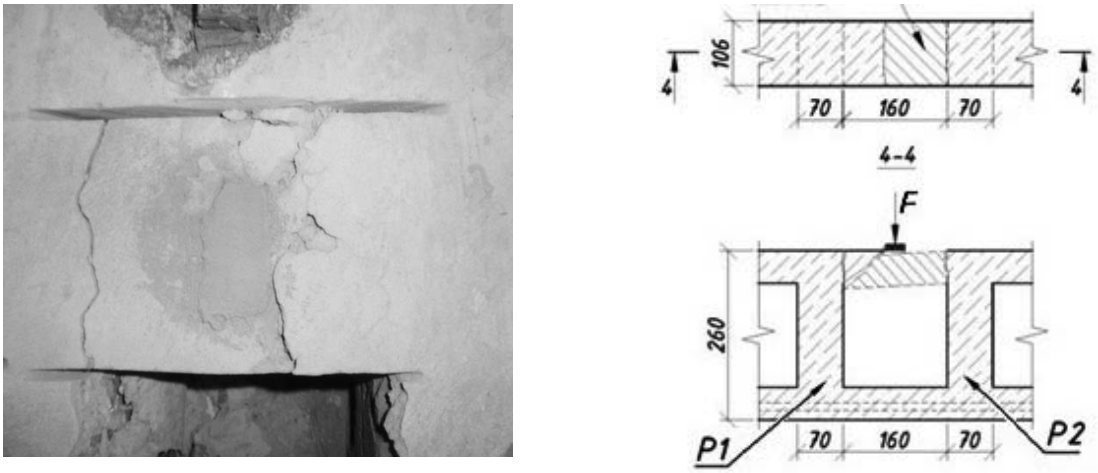


Рис. 4. Характер и схема разрушения полки типа III

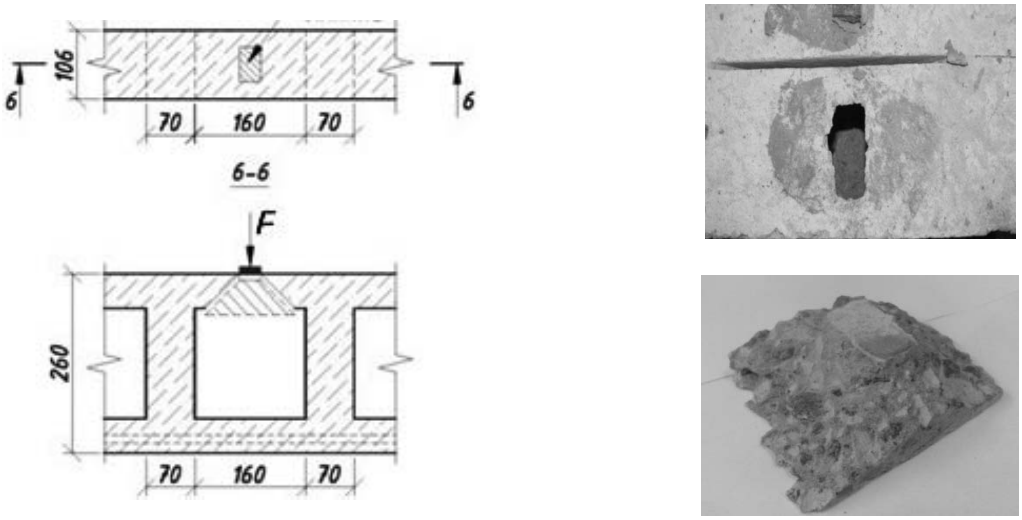


Рис. 5. Характер и схема разрушения полки типа IV

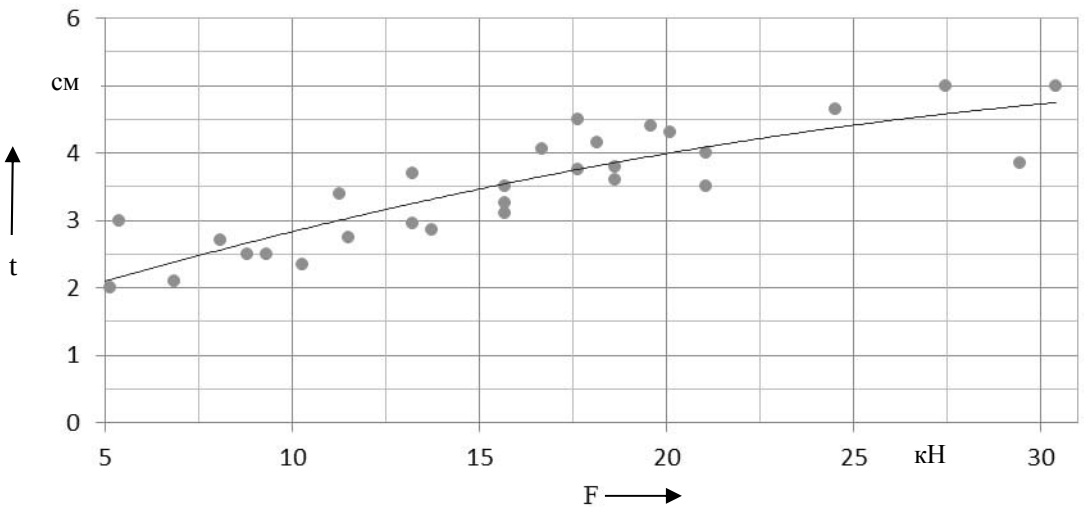


Рис. 6. Зависимость разрушающей продавливающей нагрузки F от толщины верхней полки t

Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований

Теоретические исследования предусматривали расчет продавливающей силы, определенной по методикам разных нормативных документов.

По [9] продавливающее усилие, которое может воспринять плита без поперечного армирования, находят по зависимости

$$V_{ED,k} = V_{RD,ct} \cdot u, \qquad (1)$$

где

$$V_{RD,ct} = [0{,}12k \cdot f_{c,cube}^{1/3}] \cdot d; \qquad (2)$$

d – рабочая высота сечения; $f_{c,cube}$ – кубическая прочность бетона на сжатие; u – контрольный периметр; k – коэффициент, учитывающий влияние масштабного фактора,

$$k = 1 + \sqrt{\frac{20}{d}} < 2. \qquad (3)$$

При этом принимается, что разрушение происходит под углом 26,6° по отношению к основанию плиты. В расчетной схеме (рис. 7) приняты следующие условные обозначения: A – базовое контрольное сечение; B – основная контрольная площадь; C – основной контрольный периметр u_1; D – площадь нагрузки; r_{cont} – радиус следующего контрольного периметра.

Расчет элементов без поперечной арматуры на продавливающее действие сосредоточенной силы по [10] производят исходя из расчетной схемы, представленной на рис. 8, из условия

$$F \le F_{b,ult}, \qquad (4)$$

где F – сосредоточенная внешняя продавливающая сила; $F_{b,ult}$ – предельное усилие, которое может воспринять бетон.

Усилия $F_{b,ult}$ определяют по формуле

$$F_{b,ult} = R_{bt} \cdot A_b, \qquad (5)$$

где R_{bt} – расчетное сопротивление бетона осевому растяжению; A_b – площадь расчетного поперечного сечения, расположенного на расстоянии $0{,}5h_0$ от границы площади приложения сосредоточенной силы F с рабочей высотой сечения h_0 (см. рис. 8).

Примечание – В схемах и зависимостях сохранены обозначения, принятые в соответствующих нормах.

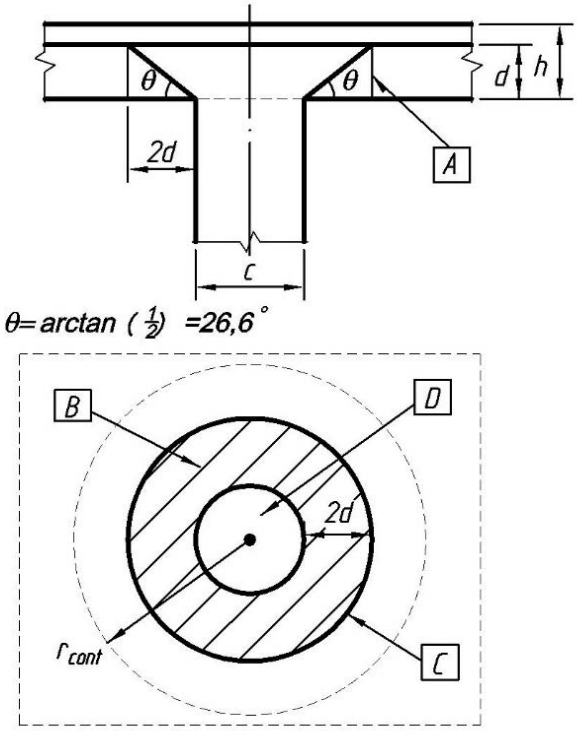


Рис. 7. Расчетная схема продавливания по [9]

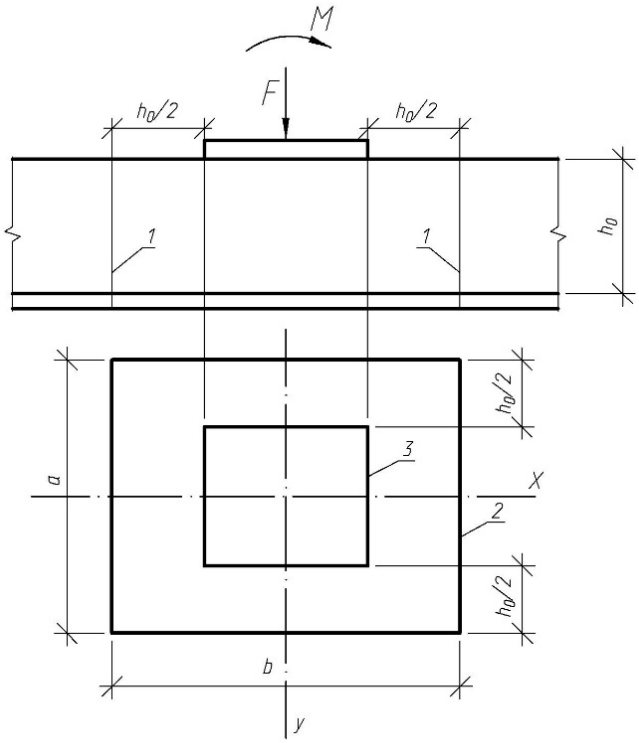


Рис. 8. Схема расчета железобетонных элементов без поперечной арматуры на продавливание по [10]: 1 – расчетное поперечное сечение; 2 – контур поперечного расчетного сечения; 3 – контур площадки загружения

Площадь поперечного расчетного сечения в общем случае определяют по формуле

$$A_b = u \cdot h_0, \qquad (6)$$

где u – периметр контура расчетного поперечного сечения; h_0 – рабочая высота сечения, $h_0 = 0{,}5(h_{0x} + h_{0y})$; h_{0x} и h_{0y} – рабочие высоты сечения для продольной арматуры, расположенной в направлении осей X и Y.

Расчет на продавливание плитных конструкций без поперечной арматуры по [11] по учету расчетных факторов аналогичен расчету по [10] и производится из условия

$$F \le \alpha R_{bt} u_m h_0, \qquad (7)$$

где F – продавливающая сила; α – коэффициент (для тяжелого бетона α = 1); R_{bt} – расчетная прочность бетона на растяжение; u_m – среднеарифметическое значение периметров верхнего и нижнего оснований пирамиды, которая образуется при продавливании в пределах рабочей высоты сечения h_0.

Поскольку в исследуемой при эксперименте полке продольная арматура отсутствовала, при определении значений продавливающей силы в расчетных зависимостях вместо h_0 принимали полную (общую) высоту сечения h (рис. 9).

Кроме определения продавливающей силы по расчетным зависимостям разных норм, находили также ее значения с использованием программного комплекса «Лира» при различной толщине полки.

Результаты определения разрушающей продавливающей нагрузки F по разным расчетным зависимостям и их сравнение с опытными значениями F представлены на рис. 10. Из сопоставления видно, что расчет по различным нормативным документам дает занижение значения продавливающей силы сравнительно с полученными опытными данными. Наилучшую сходимость с экспериментальными значениями обеспечивает расчет, выполненный по ПК «Лира».

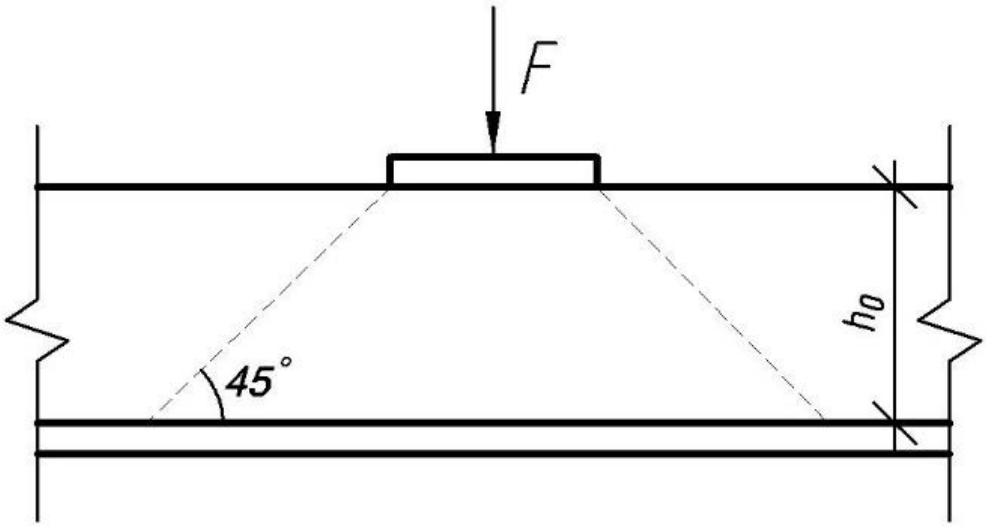


Рис. 9. Схема расчета железобетонных элементов на продавливание по [11]

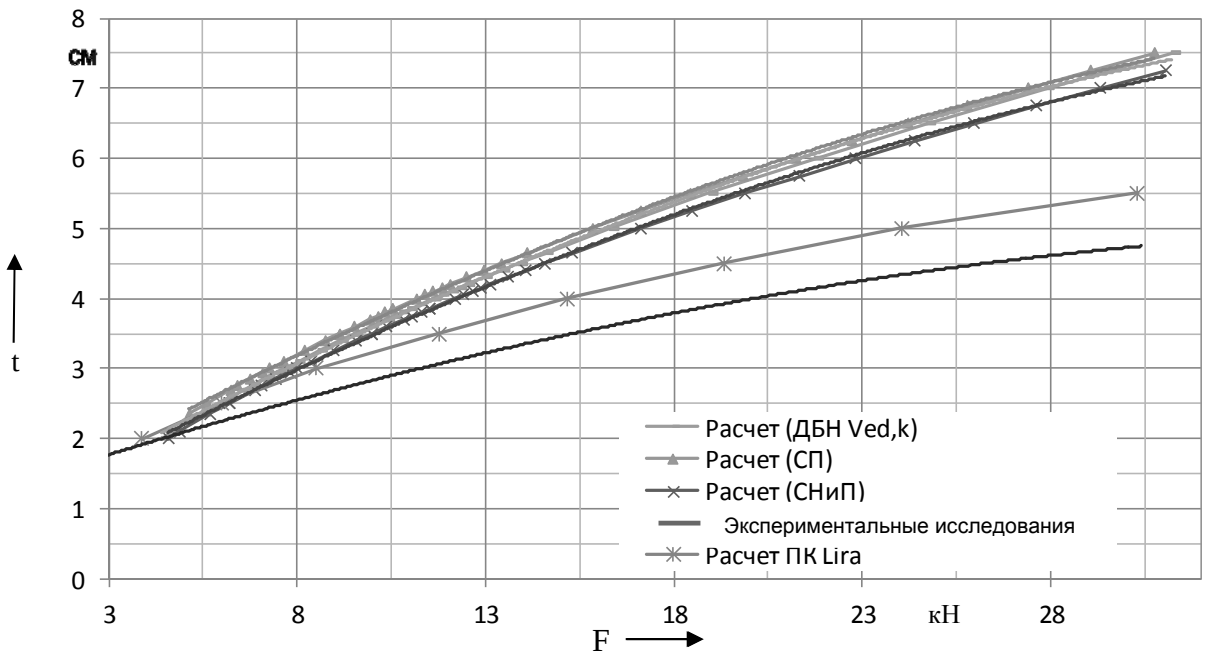


Рис. 10. Сравнение расчетных и опытных значений разрушающей нагрузки F в зависимости от толщины полки t

Моделирование работы опытных образцов в ПК «Femap»

При моделировании в ПК «Femap» задавали геометрические размеры фрагментов опытных образцов, которые по ширине отвечали размерам верхней полки в плане. Кроме того, задавали фактические физико-механические характеристики бетона, определённые испытанием кубов и призм.

Расчеты производили как в упругой стадии, так и с учетом пластических деформаций бетона. При этом опытные образцы были «разбиты» на отдельные объёмные элементы с размером ребра 5 мм.

Результаты моделирования НДС в ПК «Femap» в объёмном изображении представлены для фрагментов опытных образцов с толщиной полки 20 и 50 мм (рис. 11).

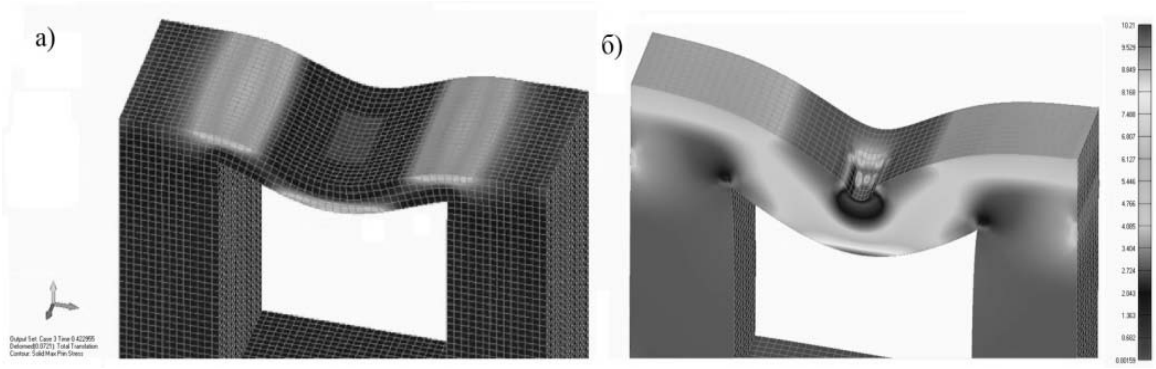


Рис. 11. Схема деформирования и характер распределения напряжений в полках: а – толщиной 20 мм; б – толщиной 50 мм

Из сравнения схем (см. рис. 11) видно, что при толщине полки 20 мм характер распределения напряжений иной, нежели в полке толщиной 50 мм. Для полки толщиной 20 мм более свойственно распределение напряжений, присущее изгибаемым элементам. В полке толщиной 50 мм под основанием штампа формируется будущая «классическая» пирамида продавливания.

Выводы

Характер разрушения верхней неармированной полки фрагментов монолитной железобетонной плиты с пустотообразующими вкладышами при испытании на продавливание был разным и в большинстве случаев не соответствовал «классической» схеме продавливания по форме пирамиды.

Опытные значения продавливающей силы даже при незначительной толщине полки (20…30 мм) при загружении штампом 3 × 5 см являлись существенными (от 5,0 до 11,5 кН) и достаточными для восприятия технологических и других сосредоточенных нагрузок. При толщине полки 40…50 см фактическое значение продавливающей силы составило от 20 до 31 кН.

Теоретические значения продавливающей силы, подсчитанной по расчетным зависимостям разных норм, дают заниженные значения продавливающей силы. Наилучшую сходимость с опытным значением продавливающей силы обеспечивает расчет с использованием ПК «Лира».

Компьютерное моделирование работы верхней полки в ПК «Femap» позволило выявить особенности и отличие напряженно-деформированного состояния полок различной толщины.

Особенность напряженно-деформированного состояния верхней полки монолитной железобетонной плиты с пустотообразующими вкладышами при сосредоточенной нагрузке необходимо учитывать при совместном действии основной (эксплуатационной) и местной нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мельник, І. В.** Конструктивно-технологічні особливості бетонних і залізобетонних конструкцій з ефективними вставками / І. В. Мельник // Науково-практичні проблеми сучасного залізобетону : зб. наук. праць. – Київ, 1997. – С. 164–171.

2. **Мельник, І. В.** Спосіб виготовлення пустотілих бетонних і залізобетонних виробів / І. В. Мельник // Деклараційний патент на винахід. – Державний департамент інтелектуальної власності. – Бюл. № 7-II від 15.12.2000.

3. **Євстаф'єв, В. І.** Полегшені багатошарові перекриття для архітектурно-будівельних систем з широким кроком несучих конструкцій : автореф. дис. … канд. техн. наук / В. І. Євстаф'єв. – Київ, 2004. – 18 с.

4. **Мельник, І. В.** Конструктивні рішення плоских монолітних залізобетонних перекриттів з ефективними вставками і експериментальне дослідження їх фрагментів / І. В. Мельник, В. М. Сорохтей // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. праць. – Рівне, 2006. – Вип. 14. – С. 253–260.

5. Опыт надстройки при реконструкции здания за счет уменьшения веса монолитной плиты перекрытия / А. М. Югов, В. В. Таран, Г. Н. Тонкачеев, В. И. Сопельник // Науковий вісник будівництва. – Харків, 2009. – Вип. 52.

6. **Сергиевский, А. Д.** Расчет плит на продавливание / А. Д. Сергиевский // Бетон и железобетон. – 1962. – № 6.

7. **Иванов, А.** Расчет прочности плоских плит перекрытий без поперечной арматуры монолитных каркасных зданий на продавливание / А. Иванов, А. С. Залесов // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 2003. – С. 200–205.

8. **Клованич, С. Ф.** Продавливание железобетонных плит : натурный и численный эксперименты / С. Ф. Клованич, В. И. Шеховцов. – Одесса, 2011. – С. 6–9.

9. **ДСТУ Б В.2.6-156:2010.** Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. – Київ, 2011.

10. **СП 52-101-2003.** Свод правил по проектированию и строительству «Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры». – М., 2003.

11. **СНиП 2.03.01-84*.** Бетонные и железобетонные конструкции. – М., 1989.

12. Експериментальні дослідження верхньої полиці монолітної залізобетонної порожнистої плити на продавлювання / І. В. Мельник, В. М. Сорохтей, Т. В. Приставський, М. І. Козак // Вісн. Львівського нац. аграрного ун-ту «Архітектури і сільськогосподарське будівництво». – 2014. – № 15. – С. 88–94.

Статья сдана в редакцию 23 мая 2016 года

Игорь Владимирович Мельник, канд. техн. наук, доц., Национальный университет «Львовская политехника». E-mail: GNDL112@ukr.net.
Василий Михайлович Сорохтей, научный сотрудник, Национальный университет «Львовская политехника». E-mail: monza@ukr.net.
Тарас Владимирович Приставский, аспирант, Национальный университет «Львовская политехника». E-mail: taras.vol@ukr.net.

Igor Vladimirovich Melnyk, PhD (Engineering), Associate Prof., Lviv Polytechnic National University. E-mail: GNDL112@ukr.net.
Vasyl Mikhailovich Sorokhtey, research fellow, Lviv Polytechnic National University. E-mail: monza@ukr.net.
Taras Vladimirovich Prystavskyy, PhD student, Lviv Polytechnic National University. E-mail: taras.vol@ukr.net.

ЭКОНОМИКА.
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 658.5

Т. В. Пузанова, А. О. Ермоленко

УПРАВЛЕНИЕ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬЮ ПРОДУКЦИИ ПРЕДПРИЯТИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

UDC 658.5

T. V. Puzanova, A. O. Ermolenko

PRODUCT COMPETITIVENESS MANAGEMENT AT A MACHINE-BUILDING ENTERPRISE

Аннотация

Осуществлена оценка уровня конкурентоспособности продукции предприятия машиностроения. Предложены мероприятия по повышению уровня конкурентоспособности и дана оценка их экономической эффективности.

Ключевые слова:

конкурентоспособность продукции, методы оценки конкурентоспособности, себестоимость продукции, производственная программа, экономическая эффективность.

Abstract

The evaluation of product competitiveness of a machine-building enterprise has been performed. The suggestions for improving the competitiveness level are offered and their cost-effectiveness is evaluated.

Key words:

competitiveness of products, competitiveness evaluation methods, production cost, production program, cost-effectiveness.

В современных условиях хозяйствования любое предприятие стремится повысить результативность своей деятельности. С учетом нынешней ситуации на рынке сложно добиться стабильного успеха в бизнесе, если не планировать его эффективное развитие. Необходимо постоянно отслеживать информацию о перспективах и возможностях предприятия, о состоянии рынков сбыта, о потребителях. Важно также аккумулировать информацию о положении конкурентов и об уровне своей конкурентоспособности.

Конкурентоспособность предприятия является относительной характеристикой, выражающей отличия развития данного предприятия от развития конкурентов по степени удовлетворения своими товарами потребностей людей и по эффективности производственной деятельности. Конкурентоспособность предприятия характеризует возможности и динамику его приспособления к условиям рыночной конкуренции.

Конкурентоспособность предприятия и прочность его положения на рынке во многом определяются конку-

© Пузанова Т. В., Ермоленко А. О., 2016

рентоспособностью выпускаемой продукции. Именно поэтому ею можно и нужно управлять.

Рассмотрим решение задачи управления конкурентоспособностью выпускаемой продукции на примере ОАО «Могилевский завод «Электродвигатель». Акционерное общество в последние годы работает в сложных конкурентных условиях на основных рынках сбыта его продукции: в РФ и в странах СНГ. За последние 5…6 лет ситуация в сегменте электродвигателей мощностью до 250 кВт радикально изменилась с приходом на рынок китайских производителей. В последние годы из-за сложной политической ситуации в Украине снизился также объем продаж на рынке этой страны. Барьером для выхода на европейские рынки является наличие жестких норм по энергоэффективности электродвигателей – обязательна поставка с классом не ниже IE3.

Одной из непопулярных, жестких, но необходимых мер в настоящий период является снижение цен на отдельные позиции поставляемой продукции. Для эффективной конкурентной борьбы и удержания на рынке нужно поставлять широкую гамму электродвигателей. В этих условиях предприятие вынуждено продавать часть двигателей с отрицательной рентабельностью, но с обязательным сохранением безубыточности в целом по спецификации.

Все вышеописанные факторы и обуславливают необходимость разработки эффективных мер по повышению конкурентоспособности продукции предприятия. Для обеспечения оперативности и возрастания точности решаемых задач применялась разработанная программно-аналитическая система на основе табличного процессора Microsoft Excel и языка программирования Visual Basic for Applications.

Предприятия машиностроения характеризуются дифференцированной номенклатурой выпускаемой продукции, поэтому прежде чем приступить к анализу конкурентоспособности, необходимо выбрать наиболее значимую для предприятия продукцию. Для этого можно провести анализ структуры реализованной продукции (рис. 1) или АВС-анализ (рис. 2).

Исходя из диаграммы, представленной на рис. 1, можно сделать вывод, что наибольшим спросом пользуются двигатели серии АИР.

Далее для выбора продукции, наиболее значимой для предприятия, необходимо провести АВС-анализ (рис. 3).

По результатам АВС-анализа можно сделать вывод, что 87 % в общем объеме реализации занимают двигатели серии АИР. Так как данная серия включает в себя различные модели электродвигателей, то целесообразно провести аналогичный анализ и внутри номенклатурной группы (см. рис. 3).

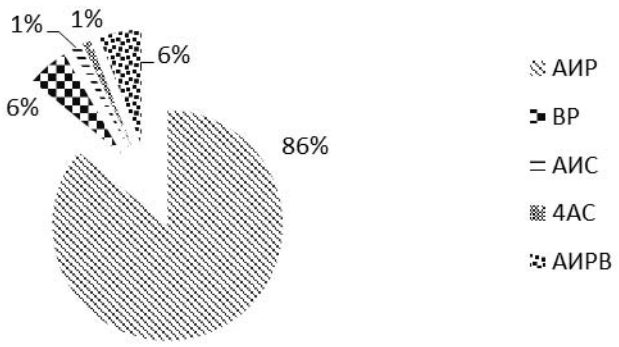


Рис. 1. Структура реализованной продукции

Серия	Объем реализации, шт.	Доля в общем объеме, %	Накопленная доля, %	Группа
АИР	279871	87	87	А
ВР	19942	6	93	В
АИРВ	17702	5	98	В
АИС	3446	1	99	С
4АС	2424	1	100	С

Рис. 2. Выходная форма с результатами АВС-анализа по сериям двигателей

Вид двигателя	Объем реализации, шт.	Доля в общем объеме, %	Накопленная доля, %	Группа
АИР80	73 847	26	26	А
АИР100	56 942	20	47	А
АИР71	44 648	16	63	А
АИР90	26 480	9	72	А
АИР112	22 753	8	80	А
АИР63	20 874	7	88	В
АИР132	15 776	6	93	В
АИР56	12 463	4	98	С
АИР160	5 647	2	100	С
АИР180	441	0,2	100	С

Рис. 3. Выходная форма с результатами АВС-анализа внутри серии АИР

Результаты АВС-анализа внутри серии АИР показывают, что наиболее значимыми для предприятия являются двигатели АИР71-112 (суммарная доля в общем объеме реализации составила 80 %). В группу В входят двигатели АИР63 и АИР112 с суммарной долей реализации, равной 13 %. Группа С включает в себя двигатели АИР56, АИР160 и АИР180.

Для оценки степени сбалансированности портфеля продукции использовалась матрица БКГ [1]. Выходные формы с результатами представлены на рис. 4 и 5.

Серия	Относительная доля рынка, %	Темп роста рынка,%	Диаметр окружности
АИР	71	91,18	0,87
ВР	20	90,09	0,06
АИС	14	110,42	0,01
4АС	32	146,37	0,01
АИРВ	5	105,11	0,06

Рис. 4. Выходная форма с данными, необходимыми для построения матрицы БКГ

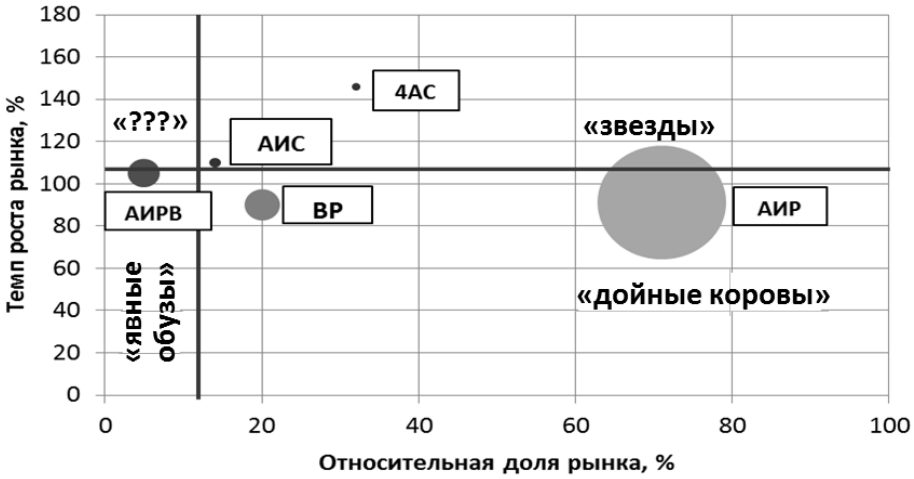


Рис. 5. Выходная форма с графическим представлением результатов БКГ-анализа

Правильно сбалансированным является такой портфель, в котором обязательно присутствуют товары в каждой группе, что позволяет предприятию постоянно обновлять продукцию и обеспечивать свою конкурентоспособность.

Очевидно, что портфель продукции достаточно сбалансирован. К группе «дойные коровы» относятся товары серий АИР и ВР. Они являются источниками дохода предприятия, а следовательно, и источниками инвестиций для развития товаров, входящих в группу «звезды». Таким образом, наиболее значимые товары для предприятия – двигатели серии АИР, а именно: двигатели АИР71, АИР80, АИР90, АИР100 и АИР 112.

Рынки сбыта электродвигателей ОАО «Могилевский завод «Электродвигатель» (МэЗ) можно разделить по географическому признаку и по степени важности расположить в следующем порядке.

1. Российская Федерация, с долей продаж 64,5 %.

2. Республика Беларусь, с долей продаж 25 %.

3. Украина, с долей продаж 8,5 %.

4. Другие страны СНГ, с долей продаж 1,2 %.

5. Страны Прибалтики, с долей продаж 0,8 %.

Оценку конкурентоспособности целесообразно проводить на рынке Республики Беларусь и рынке Российской Федерации. Для этого необходимо выбрать основных конкурентов на каждом из этих рынков. Такими конкурентами на рынке Республики Беларусь являются: ОАО «Полесьеэлектромаш», г. Лунинец; СП ООО «Нодвиг», г. Новополоцк. На рынке Российской Федерации: ОАО «ЭЛДИН», г. Ярославль; ОАО «Уралэлектро», г. Медногорск.

С учетом ассортимента выпускаемой на данных предприятиях продукции для оценки конкурентоспособности были выбраны двигатели АИР71 и АИР80. Для проведения оценки были определены основные группы показателей, а также их весовые коэффициенты методом Саати с привлечением в качестве экспертов специалистов предприятия (табл. 1).

Конкурентоспособность продукции оценивалась методом комплексной оценки (по наибольшему значению показателя), разностным методом (по наименьшему значению показателя), а также методом построения радара конкурентоспособности.

Результаты оценки конкурентоспособности двигателя АИР71 на рынке Республики Беларусь представлены на рис. 6 и 7.

Табл. 1. Коэффициенты веса оцениваемых групп показателей

Группа показателей	Коэффициент веса
Технические	0,28
Эргономические	0,09
Нормативные	0,15
Экономические	0,27
Организационно-экономические	0,05
Организационные	0,05
Ассортимент	0,10

Методика оценки	***МэЗ***	***Нодвиг***	***Полесьеэлектромаш***
Комплексная оценка	0,93	0,96	0,77
Разностный метод	0,07	0,06	0,16
Радар конкурентоспособности	0,77	0,69	0,58

Рис. 6. Выходная форма с результатами оценки уровня конкурентоспособности двигателя АИР71 на рынке РБ

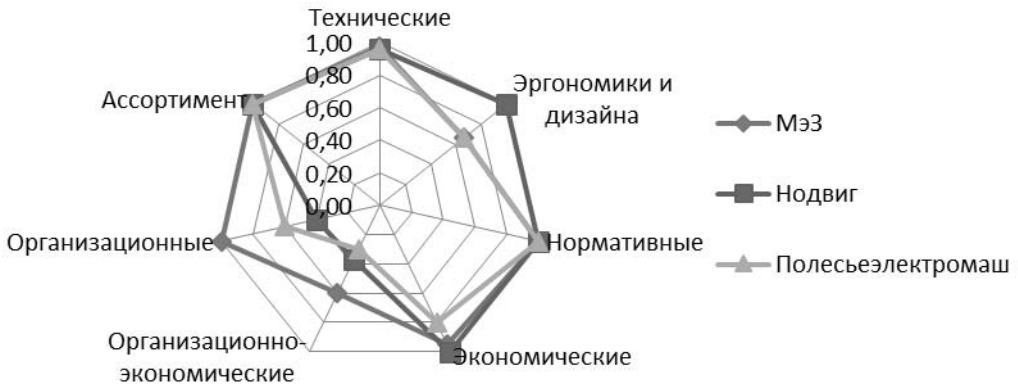


Рис. 7. Выходная форма с радаром конкурентоспособности для двигателя АИР71 на рынке РБ

На данной форме в соответствии с указанной количественной оценкой продукция ОАО «Могилевский завод «Электродвигатель» по двум методам оценки уступает продукции СП ООО «Нодвиг», а по третьему – занимает первое место среди конкурентов.

Для того чтобы наглядно определить слабые места двигателя АИР71, строится радар конкурентоспособности, на котором отображается информация по конкурентам. На рис. 7 видно, что АИР71, произведенный на МэЗ, уступает своему главному конкуренту по эко-

номическим показателям и показателям эргономики и дизайна, а по организационным и организационно-экономическим показателям превосходит обоих конкурентов.

Результаты оценки конкурентоспособности для двигателя АИР71 на рынке Российской Федерации представлены на рис. 8 и 9.

Методика оценки	*МэЗ*	*ЭЛДИН*	*Уралэлектро*
Комплексная оценка	0,85	0,95	0,90
Разностный метод	0,11	0,03	0,10
Радар конкурентоспособности	0,70	0,75	0,67

Рис. 8. Выходная форма с результатами оценки уровня конкурентоспособности двигателя АИР71 на рынке РФ

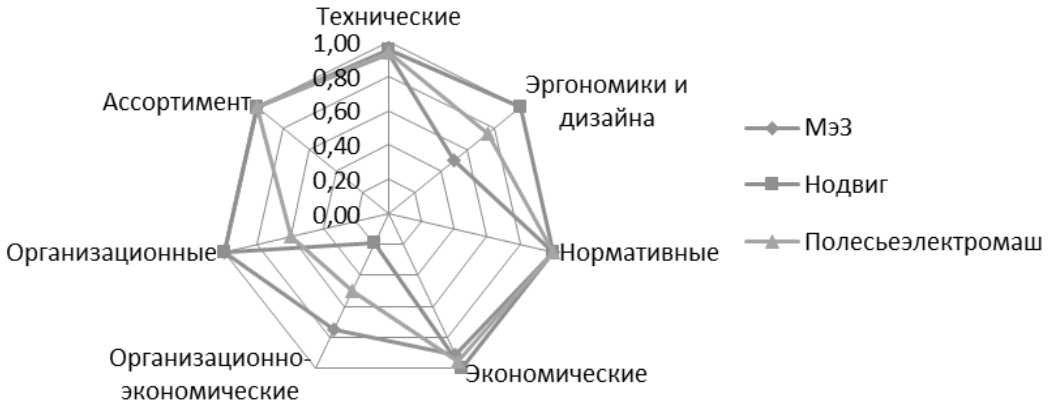


Рис. 9. Выходная форма с радаром конкурентоспособности для двигателя АИР71 на рынке РФ

Результаты показывают, что на российском рынке положение предприятия хуже по отношению к основным конкурентам. Интегральные показатели конкурентоспособности, рассчитанные по методике комплексной оценки и разностным методом, хуже, чем аналогичные, рассчитанные для продукции предприятий-конкурентов. Показатель качества, рассчитанный при построении радара конкурентоспособности, ниже, чем у электродвигателей предприятия ОАО «ЭЛДИН», но выше, чем у продукции предприятия ОАО «Уралэлектро».

Для определения показателей, по которым двигатели ОАО «Могилевский завод «Электродвигатель» уступают конкурентам, необходимо наглядно представить радар конкурентоспособности (см. рис. 9).

Оценка уровня конкурентоспособности проводилась также для двигателя АИР80 на белорусском и российском рынках. Результаты оценки конкурентоспособности двигателя АИР80 на рынке Республики Беларусь представлены на рис. 10 и 11.

Из рисунков видно, что на белорусском рынке двигатель АИР80, изготавливаемый МэЗ, занимает первое место при построении радара конкурентоспособности и второе место при других методах оценки, однако слабыми местами также являются внешний вид и высокая цена.

Методика оценки	МэЗ	Нодвиг	Полесьеэлектромаш
Комплексная оценка	0,91	0,95	0,88
Разностный метод	0,08	0,07	0,12
Радар конкурентоспособности	0,77	0,66	0,60

Рис. 10. Выходная форма с результатами оценки уровня конкурентоспособности двигателя АИР80 на рынке РБ

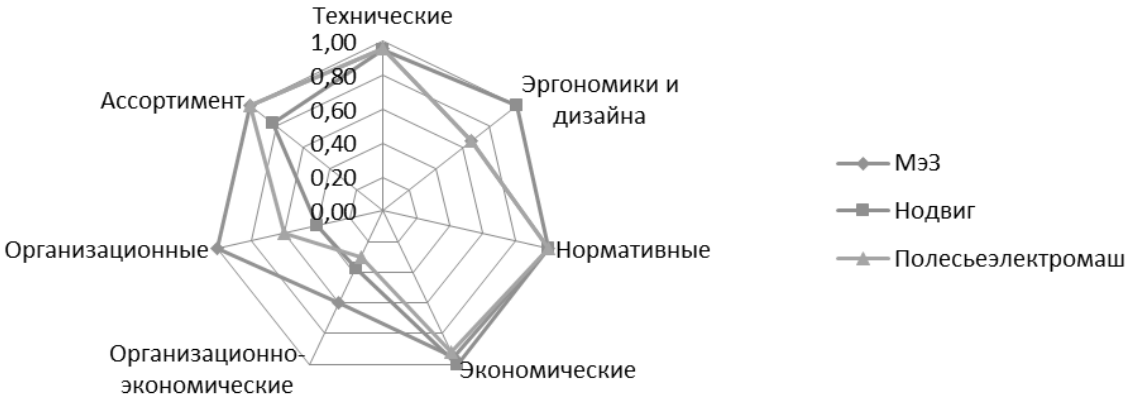


Рис. 11. Выходная форма с радаром конкурентоспособности для двигателя АИР80 на рынке РБ

На рынке Российской Федерации ситуация складывается иным образом (рис. 12). Оценка уровня конкурентоспособности методом комплексной оценки показывает, что двигатель хуже, чем у обоих конкурентов, а две другие методики поставили его на второе место.

По радару конкурентоспособности видно, что на российском рынке двигатель белорусского предприятия уступает не только по внешнему виду и экономическим факторам, но также и по организационным показателям (рис. 13).

Методика оценка	МэЗ	ЭЛДИН	Уралэлектро
Комплексная оценка	0,87	0,94	0,90
Разностный метод	0,12	0,06	0,13
Радар конкурентоспособности	0,66	0,75	0,60

Рис. 12. Выходная форма с результатами оценки уровня конкурентоспособности двигателя АИР80 на рынке РФ

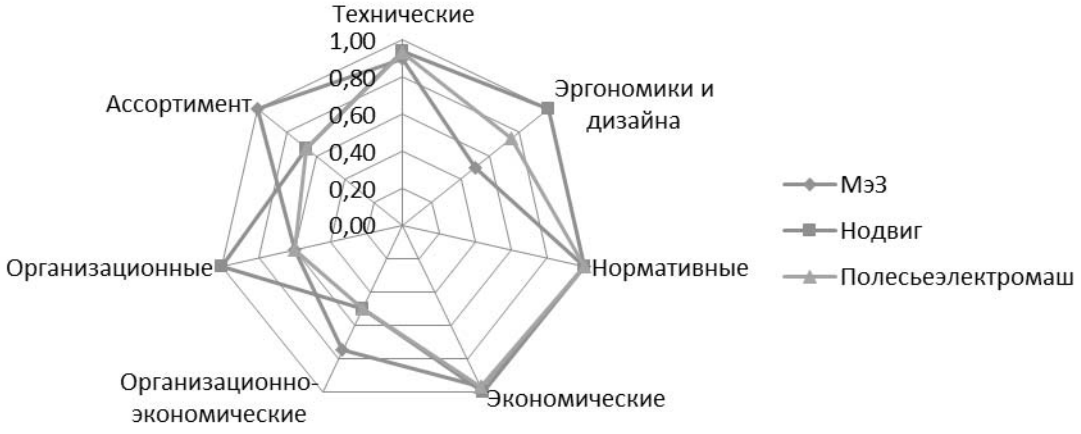


Рис. 13. Выходная форма с радаром конкурентоспособности для двигателя АИР80 на рынке РФ

Таким образом, по результатам оценки конкурентоспособности двигателей АИР71 и АИР80 на белорусском и российском рынках можно сделать вывод, что двигатели ОАО «Могилевский завод «Электродвигатель» уступают своим конкурентам по экономическим показателям и показателям эргономики и дизайна.

Так как современные предприятия функционируют в условиях ограниченности имеющихся ресурсов, то вышерассмотренная методика используется для последующего обоснования мероприятий по повышению конкурентоспособности выпускаемой продукции. Для роста уровня конкурентоспособности необходимы соответствующие мероприятия по снижению себестоимости и улучшению внешнего вида электродвигателей. Проведена оценка экономической эффективности ряда мероприятий, направленных на снижение трудоемкости и материалоемкости при производстве двигателей рассмотренных видов. Эти изменения приведут к падению себестоимости единицы продукции в целом на 4,99 % (рис. 14). При этом выделенное на рисунке четвертое мероприятие направлено также на улучшение внешнего вида двигателей.

При планировании производственной программы необходимо учесть возможность снижения цены с целью повышения конкурентоспособности продукции на анализируемых рынках. В табл. 2 представлена информация об ожидаемом изменении положения продукции ОАО «Могилевский завод «Электродвигатель» среди конкурентов до и после рассмотренных мероприятий.

Ожидается, что после проведения предложенных мероприятий продукция ОАО «Могилевский завод «Электродвигатель» на белорусском рынке может занять позицию лидера, а на российском – подняться на одну позицию.

С учетом снижения цены, а также проведения других мероприятий по повышению конкурентоспособности, предприятие в планируемом периоде может рассчитывать на возрастание или сохранение уровня спроса, что принято во внимание при оптимизации производственной программы [2], результаты которой представлены на рис. 15.

При этом по рассматриваемым видам электродвигателей планируемый уровень рентабельности составит 25 %. Плановая прибыль от реализации электродвигателей АИР71 и АИР80 на белорусском и российском рынках ожидается на уровне 24 563 млн р. В табл. 3 представлены результаты оценки экономической эффективности предложенных мероприятий.

Мероприятие	Производственная с/с		Изменение, %
	До	После	
1.Внедрение токарного станка с ЧПУ с приводным инструментом для обработки алюминиевых щитов	736 401,45	735 457,77	0,13
2.Внедрение пилы для резки заготовок круглого проката валов	736 401,45	728 567,69	1,06
3.Внедрение оснастки для механизированной намотки, втяжки катушек, формовки с подколкой статоров обмотанных двигателей	736 401,45	717 963,66	2,50
4.Внедрение установки для пневматического нанесения ЛКМ на основе растворителя в электростатическом поле	736 401,45	727 417,48	1,22
5. Внедрение технологического процесса сборки двигателя с помощью резьбовыдавливающих винтов	736 401,45	735 863,68	0,07
	Общее изменение с/с, %		
	4,99		

Рис. 14. Выходная форма с результатами расчета процента снижения себестоимости

Табл. 2. Результаты проведения оценки конкурентоспособности

Методика оценки	АИР71 (рынок РБ)		АИР80 (рынок РБ)		АИР71 (рынок РФ)		АИР80 (рынок РФ)	
	до	после	до	после	до	после	до	после
Комплексная оценка	2	1	2	1	3	3	3	2
Разностный метод	2	1	2	1	3	2	2	2
Радар конкурентоспособности	1	1	1	1	2	1	2	1

Двигатель	Рынок	Спрос, шт.	ПМ, шт.	Удельные переменные затраты, тыс. р.	Совокупные постоянные затраты, тыс. р.	Цена ед., тыс. р.	Плановый объем производсва
АИР71	РБ	11275	53620	491,07	3 126 019,73	818,60	11275
	РФ	29090			8 603 185,77	1 015,80	29090
АИР80	РБ	19171	98850	586,77	6 866 381,84	991,37	19171
	РФ	49464			17 716 046,58	1 277,40	49464

Рис. 15. Входная форма с результатами планирования производственной программы

Табл. 3. Показатели эффективности предложенных мероприятий

Плановая прибыль от реализации, млн р.	Плановая чистая прибыль, млн р.	Капитальные затраты, млн р.	Срок окупаемости, мес.
24563,8	1678,5	11246,5	6,7

При условии сохранения объемов реализации остальных видов электродвигателей на уровне предыдущего года данное обстоятельство позволит частично компенсировать убыток или, в лучшем случае, обеспечить безубыточную работу предприятия в плановом периоде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кузин, Б. И.** Методы и модели управления фирмой / Б. И. Кузин, В. Н. Юрьев, Г. М. Шахдинаров. – СПб. : Питер, 2001. – 432 с.

2. Бухалков, М. И. Планирование на предприятии : учебник / М. И. Бухалков. – 4-е изд., испр. и доп. – М. : ИНФРА-М, 2012. – 411 с.

Статья сдана в редакцию 28 июня 2016 года

Татьяна Владимировна Пузанова, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-296-63-17-35.
Анастасия Олеговна Ермоленко, студент, Белорусско-Российский университет.

Tatyana Vladimirovna Puzanova, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-296-63-17-35.
Anastasiya Olegovna Ermolenko, student, Belarusian-Russian University.

ВЕСТНИК
БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 3(52) 2016

Ответственный за выпуск	В. И. Кошелева
Оформление обложки	Е. С. Фитцова
Дизайн и компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Адрес редакции: пр. Мира, 43, Белорусско-Российский университет, корп. 1, комн. 331, 212000, г. Могилев. Телефон: 26-61-00, e-mail: bru@bru.mogilev.by.

Журнал «Вестник Белорусско-Российского университета» зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь. Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1240 от 08.02.2010.

Подписано в печать 31.08.2016. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 22,08. Уч.-изд. л. 20,0. Тираж 100 экз. Заказ 4524.

УПКП «Могилевская областная укрупненная типография
имени Спиридона Соболя»
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий:
№ 1/116 от 17.12.2013,
№ 2/24 от 12.12.2013.
Ул. Первомайская, 70, 212030, г. Могилев, Республика Беларусь